

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra teoretické elektrotechniky

## **Bakalářská práce**

# **Vliv nadzemního elektrického vedení na úložná zařízení**

Plzeň, 2012

Martin Adámek

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin ADÁMEK**  
Osobní číslo: **E09B0003P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Vliv nadzemního elektrického vedení na úložná zařízení**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### 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. Klasifikujte nežádoucí proudy ve vyšetřovaných úložných zařízeních.
3. Numericky řešte vliv elektromagnetického pole venkovních vedení na vybraná úložná zařízení.
4. Navrhněte možnosti potlačení vlivu elektromagnetických polí na úložná zařízení.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské 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.
4. Koudelka, C.: Bludné proudy, VŠB - TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ostrava, prosinec 2003.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Lenka Šroubová**

Katedra teoretické elektrotechniky

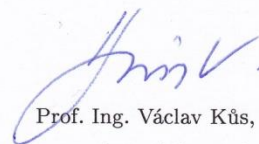
Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry



V Plzni dne 17. října 2011

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím uvedené literatury. Veškerý použitý software při vypracování bakalářské práce je legální a byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

Vedoucí této práce byla Ing. Lenka Šroubová.

V Plzni, 29. května 2012

.....  
Martin Adámek

## Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat zejména Ing. Lence Šroubové za laskavý přístup a za obětavost a ochotu při zpracovávání této práce. Děkuji za cenné rady a připomínky, jež pomohly zlepšit a doplnit tuto práci.

## **Anotace**

Předložená práce pojednává o nežádoucích jevech vznikajících v úložných zařízeních umístěných v blízkosti venkovních vedení vysokých a velmi vysokých napětí. Zejména je zde řešen vliv elektromagnetických polí vytvořených venkovním nadzemním vedením na blízké vodovody a plynovody numerickými metodami. Dále je pak věnována pozornost možné eliminaci vzniklých nežádoucích jevů.

## **Klíčová slova**

elektromagnetické pole, numerické řešení, Agros2D, venkovní vedení, úložné zařízení

## **Abstract**

The study deals with the undesirable effects arising in buried pipelines located in the vicinity of transmission lines. In particular, there is solved influence of electromagnetic fields from transmission lines on nearby buried pipelines by numerical methods. Further attention is paid to possible elimination of arising undesirable effects.

## **Key words**

electromagnetic field, numerical solution, Agros2D, transmission lines, buried pipeline

<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ.....</b>	<b>10</b>
<b>1 TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE .....</b>	<b>11</b>
1.1 Základní pojmy .....	11
1.2 Veličiny elektromagnetického pole a jejich jednotky.....	12
1.3 Maxwellovy rovnice .....	14
<b>2 NORMY VZTAHUJÍCÍ SE K ŘEŠENÍ NEBEZPEČNÝCH VLIVŮ TROJFÁZOVÝCH VENKOVNÍCH VEDENÍ.....</b>	<b>16</b>
<b>3 VLIV STŘÍDAVÝCH ROZVODNÝCH SYSTÉMŮ (LINKY VVN A ZVN) NA ÚLOŽNÁ ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>17</b>
3.1 Kapacitní vliv .....	17
3.2 Induktivní vliv .....	18
3.3 Galvanický vliv.....	21
3.4 Koroze indukovanými střídavými proudy .....	21
<b>4 VLIV STEJNOSMĚRNĚ ELEKTRIZOVANÝCH SOUSTAV NA ÚLOŽNÁ ZAŘÍZENÍ 23</b>	<b>23</b>
4.1 Přirozená zemní proudová pole .....	23
4.2 Umělá zemní proudová pole.....	23
4.3 Elektrochemická koroze způsobená vlivem bludných proudů.....	24
4.4 Opatření pro omezení vzniku bludných proudů .....	26
4.5 Základní ochrany úložných zařízení .....	26
<b>5 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA ČESKÉ REPUBLIKY.....</b>	<b>28</b>
5.1 Základní dělení stožárů vysokého napětí.....	28
5.2 Vybrané typy venkovních stožárů vysokého napětí .....	30
<b>6 VYBRANÁ ÚLOŽNÁ ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>33</b>

<b>7</b>	<b>NUMERICKÉ ŘEŠENÍ VLIVU VENKOVNÍCH VEDENÍ VVN NA ÚLOŽNÁ ZAŘÍZENÍ</b>	<b>34</b>
7.1	Matematický model .....	34
7.2	Vstupní parametry pro výpočet .....	35
7.3	Numerický výpočet pro stožár typu „soudek“ .....	37
7.4	Možnosti eliminace .....	41
7.5	Numerický výpočet pro stožár typu „kočka“ .....	46
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>49</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>50</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>51</b>



## Úvod

Již od pradávna vyžaduje naše civilizace pro své žití stále větší komfort, který je v dnešní době svázán s dodávkou mnoha forem energií, produktů a poskytováním služeb. Každé uvedené uspokojení vyžaduje rozdílný typ technického řešení, ta se však mohou navzájem limitovat. Naším úkolem je pak zhotovit fungující systém, ve kterém budou nežádoucí jevy vzniklé vzájemným ovlivňováním zanedbatelné.

Neodmyslitelnou součástí dnešního života je dodávka elektrické energie. Elektrická energie je rozváděna z míst výroby do míst spotřeby pomocí venkovních, popřípadě kabelových, vedení. Během rozvodu dochází ke vzniku mnoha nežádoucích jevů, které musejí být určitým způsobem řešeny.

Přenos elektrické energie a její vliv na své okolí je úzce spjat s elektrickým a magnetickým polem. Elektromagnetické souvislosti jsou zkoumány již od první poloviny 19. století, kdy Hans Christian Oersted experimentálně dokázal, že elektrický proud je vždy doprovázen magnetismem. O několik let později dokázal Michael Faraday jev opačný – magnetismem se může indukovat elektrický proud [1].

Cílem této práce je řešit vliv magnetického pole v okolí přenosových vedení na úložná zařízení, tj. plynovodné potrubí, vodovodní potrubí, ropovodní potrubí aj., a to numerickými metodami.

## Seznam symbolů

$A$ [Wb/m]	Vektorový magnetický potenciál
$B$ [T]	Magnetická indukce
$D$ [C/m <sup>2</sup> ]	Elektrická indukce
$E$ [V/m]	Intenzita elektrického pole
$H$ [A/m]	Intenzita magnetického pole
$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Hustota elektrického proudu
$a$ [m]	Šířka souběhu
$D$ [m]	Vnější průměr potrubí
$f$ [Hz]	Kmitočet sítě
$I$ [A]	Elektrický proud
$I_k$ [A]	Jednofázový zkratový proud
$l$ [km]	Délka výpočetního úseku souběhu
$M$ [μH/km]	Součinitel vzájemné indukčnosti
$Q$ [C]	Elektrický náboj
$R$ [Ω]	Elektrický odpor
$u_i$ [V]	Indukované napětí
$\gamma$ [S/m]	Konduktivita (měrná elektrická vodivost)
$\delta$ [m]	Tloušťka izolace potrubí
$\mu$ [H/m]	Permeabilita
$\mu_r$ [-]	Relativní permeabilita
$\mu_0$ [H/m]	Permeabilita vakua
$\Phi$ [Wb]	Magnetický indukční tok
$\Psi$ [C]	Elektrický indukční tok
$\omega$ [1/s]	Kruhová frekvence

# 1 Teorie elektromagnetického pole

Základem nových názorů o elektřině a magnetismu jsou experimenty prováděné Michaelem Faradayem (1791–1867), jenž objevil roku 1831 zákon elektromagnetické indukce. M. Faradayovi nestačilo pouhé odhalení jevů, jeho snažením bylo také jejich fyzikální vysvětlení. Jelikož ale nebyl matematicky školen, ani se nesnažil svoje myšlenky vyjádřit matematicky. Toho se ujal až James Clerk Maxwell (1831–1879), který myšlenky a poznatky Faradaye geniálně zobecnil a matematicky zpracoval. Maxwell rozvinul Faradayův pojem elektromagnetické pole a pro všechny, do té doby zjištěné, elektromagnetické jevy formuloval několik obecných časově-prostorových zákonů, které popsals poměrně jednoduchými rovnicemi matematicky [2].

## 1.1 Základní pojmy

Elektromagnetické pole se rozkládá v prostoru a může se měnit v závislosti na čase. Veličiny, kterými se popisuje toto pole, jsou tedy obecně funkcí času a tří geometrických souřadnic.

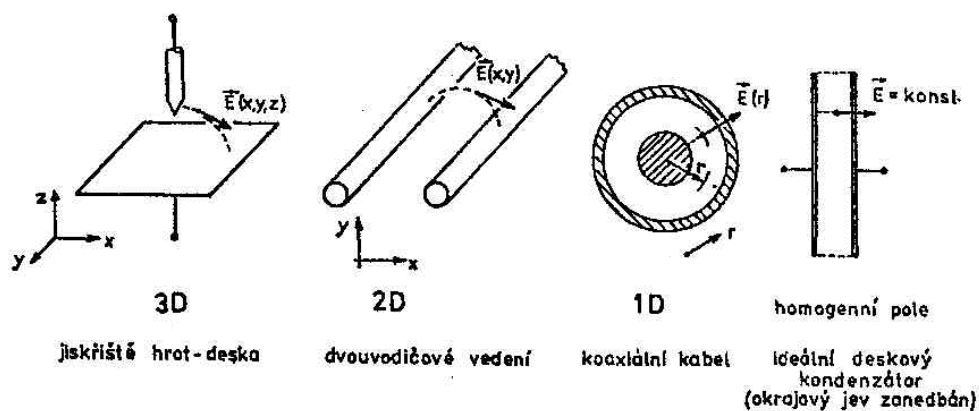
### Podle časového průběhu rozlišujeme:

1. Pole časově neproměnné. Jsou zde dva stavy, a to pole statické (jsou-li náboje v klidu) a pole stacionární (jsou-li náboje v nerovnoměrném pohybu – tvoří-li stejnosměrný proud).
2. Pole časově proměnné čili nestacionární. Mění-li se pole s časem relativně pomalu, nazýváme ho polem kvazistacionárním. Mění-li se s časem periodicky, říkáme, že je v ustáleném stavu. Jestliže se pole mění s časem podle sinové nebo kosinové funkce, nastává speciální případ, který nazýváme harmonickým ustáleným stavem. Speciálním případem je také pole časově neproměnné. Přechází-li pole z jednoho ustáleného stavu do druhého, dochází k jeho neustálenému (přechodovému) stavu. Ten nastane tehdy, mění-li zdroj pole své parametry, respektive svou polohu v prostoru.

### Podle prostorového průběhu rozlišujeme:

1. Trojrozměrné (trojdimenzionální, prostorové) pole: jsou-li veličiny charakterizující pole funkcemi tří geometrických souřadnic (př.:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), označujeme jej 3D polem.
2. Dvojrozměrné (dvojdímenzionální) pole: jsou-li veličiny charakterizující pole funkcemi dvou geometrických souřadnic. Příklad takového pole je pole rovinné (je funkcí souřadnic  $x$  a  $y$ ). Označujeme jej 2D polem.
3. Jednorozměrné (jednodímenzionální) pole: jsou-li veličiny charakterizující pole funkcemi jedné geometrické souřadnice (např.  $x$  nebo  $y$ ), označujeme jej 1D polem.

4. Homogenní pole: jsou-li veličiny charakterizující pole v kterémkoli bodě uvažované oblasti prostoru tytéž (tj. nejsou závislé na geometrických souřadnicích) [2].



Obr. 1. Příklad 3D, 2D, 1D a homogenního elektrostatického pole [2].

## 1.2 Veličiny elektromagnetického pole a jejich jednotky

Zde je uveden stručný přehled veličin elektromagnetického pole převzatých z [2].

### Elektrický náboj $Q$

Elektrický náboj  $Q$  je skalární veličina, jejíž jednotkou je coulomb [C]. Jeho charakter je kvantový, což znamená, že je roven celistvému násobku elementárního náboje  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C. V technických aplikacích k tomuto však nepřihlížíme.

Náboj  $Q$  může být rozložen následovně:

1. Prostorově v objemu  $V$ , s objemovou hustotou.

$$\rho = \frac{dQ}{dV} \quad [\text{C}/\text{m}^3] \quad (1.1)$$

2. Plošně na ploše  $S$ , s plošnou hustotou.

$$\sigma = \frac{dQ}{dS} \quad [\text{C}/\text{m}^2] \quad (1.2)$$

3. Lineárně na křivce  $l$ , s lineární hustotou.

$$\tau = \frac{dQ}{dl} \quad [\text{C}/\text{m}] \quad (1.3)$$

4. Diskrétně (tj. soustředěn do jednoho bodu).

### Elektrický proud $I$

Elektrický proud  $I$  je skalární veličina, jejíž jednotkou je ampér [A]. Tvoří ho upořádaný pohyb elektrických nábojů.

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad [\text{A}] \quad (1.4)$$

**Intenzita elektrického pole  $E$** 

Intenzita elektrického pole  $E$  je vektorová veličina, jež charakterizuje elektrické pole. Definujeme ji jako sílu působící na nepohybující se jednotkový bodový náboj.

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{Q} \quad [\text{V/m}] \quad (1.5)$$

Kde  $F_e$  je elektrická síla působící na náboj  $Q$ .

**Elektrická indukce  $D$** 

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad [\text{C/m}^2] \quad (1.6)$$

Veličina  $\varepsilon$  charakterizuje elektrické vlastnosti prostředí a nazýváme ji permitivita.

**Intenzita magnetického pole  $H$** 

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \quad [\text{A/m}] \quad (1.7)$$

Veličina  $\mu$  charakterizuje magnetické vlastnosti prostředí a nazýváme ji permeabilita.

**Magnetická indukce  $B$** 

Magnetická indukce  $B$  je vektorová veličina, která charakterizuje magnetické pole.

$$\mathbf{F}_m = Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad [\text{N}] \quad (1.8)$$

$F_m$  je magnetická síla, která působí na náboj  $Q$ , jenž se pohybuje rychlostí  $v$ . Jednotkou magnetické indukce je tesla [T].

**Proudová hustota  $J$** 

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad [\text{A/m}^2] \quad (1.9)$$

Veličina  $\gamma$  se nazývá konduktivita neboli měrná elektrická vodivost.

**Elektrický indukční tok**

$$\Psi = \int_S \mathbf{D} d\mathbf{S} \quad [\text{C}] \quad (1.10)$$

**Magnetický indukční tok**

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} \quad [\text{Wb}] \quad (1.11)$$

**Elektrický proud**

$$I = \int_S \mathbf{J} d\mathbf{S} \quad [\text{A}] \quad (1.12)$$

### 1.3 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice jsou základní zákony v makroskopické teorii elektromagnetického pole. Mají tvar integrální, jenž popisuje elektromagnetické pole v určité prostorové oblasti, a tvar diferenciální, popisující pole v určitém bodu této oblasti [2].

Název rovnice	Integrální tvar	Diferenciální tvar
1. Maxwellova rovnice	$\oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}$	$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}$
2. Maxwellova rovnice	$\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$	$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}$
3. Maxwellova rovnice	$\oint_s \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q$	$\text{div}\mathbf{D} = \rho$
4. Maxwellova rovnice	$\oint_s \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$	$\text{div}\mathbf{B} = 0$

Tabulka 1. Úplná soustava Maxwellových rovnic [2].

#### I. Maxwellova rovnice

I. MR, neboli zákon celkového proudu, v integrálním tvaru ukazuje, že zdrojem magnetického pole není pouze vodivý proud, ale také časově proměnný indukční tok  $\Psi$ , jenž vytváří tzv. posuvný (Maxwellův) proud  $\frac{d\Psi}{dt}$ .

#### II. Maxwellova rovnice

II. MR, neboli Faradayův indukční zákon, matematicky popisuje, že existence časově proměnného magnetického pole je počátkem vzniku pole elektrického. Z diferenciálního tvaru lze odvodit, že toto vzniklé pole je vírové ( $\text{rot}\mathbf{E} \neq 0$ ). Smyčku  $c$  lze chápat jako fiktivní (pak jí proud ovšem neprochází), anebo jako vodič o odporu  $R$ . V tomto případě skrze ni protéká indukovaný proud:

$$i(t) = \frac{u_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.13)$$

Směr indukovaného proudu ukazuje Lenzovo pravidlo: indukovaný proud je vždy takového směru, že svým magnetickým polem zabraňuje časové změně magnetického toku, jež způsobila jeho vytvoření.

### **III. Maxwellova rovnice**

III. MR, neboli Gaussova věta, říká, že elektrický indukční tok  $D$  libovolnou vně orientovanou uzavřenou plochou  $S$  je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti  $V$  ohraničené plochou  $S$ .

### **IV. Maxwellova rovnice**

IV. MR, neboli zákon spojitosti magnetického indukčního toku, ukazuje, že magnetický indukční tok libovolnou orientovanou uzavřenou plochou  $S$  se rovná nule.

Z Maxwellových rovnic lze dosvědčit, že magnetické pole je nezřídlové (magnetické indukční čáry jsou uzavřené, poněvadž neexistuje žádný volný magnetický náboj). Elektrické pole je naopak zřídlové [2].

## **2 Normy vztahující se k řešení nebezpečných vlivů trojfázových venkovních vedení**

### **ČSN 33 2165**

Analytická řešení výpočtů vlivu nadzemních vedení vvn na blízká úložná zařízení z teorie elektromagnetického pole jsou velice složitá, tato norma skýtá zjednodušené postupy opírající se nejen o teorii elektromagnetického pole, ale též o zkušenosti.

Norma zahrnuje zásady pro projektování a stavbu ocelových potrubí, která jsou uložena v zemi v blízkosti venkovních 3f vedení a elektrických stanic vvn a zvn, dále požadavky na projektování a výstavbu venkovních 3f vedení a elektrických stanic vvn a zvn situovaných v blízkosti ocelových izolovaných potrubí, jež jsou uložena v zemi. Obsahem jsou požadavky na volbu trasy, meze nebezpečných vlivů, jejich výpočet a konečně ochranná opatření obecně a zvláště při montáži. ČSN 33 2165 byla schválena 6. 4. 1989 a nabyla účinnosti (dnem) 1. 3. 1990. Nyní se však ve spolupráci se ZČU FEL připravuje norma nová, jež ČSN 33 2165 nahradí.

### **ČSN EN 50341-1**

Norma platící pro elektrická venkovní vedení se jmenovitým napětím nad 45 kV AC a jmenovitým kmitočtem do 100 Hz. Předepisuje všeobecné požadavky, které se musí dodržet při návrhu a stavbě nových venkovních vedení s cílem zajistit, aby vedení vyhovovala svému účelu se zřetelem na dodržení bezpečí osob, údržbu, provoz a prostředí. Norma neplatí pro navrhování a stavbu venkovních vedení s izolovanými vodiči, kde vnitřní a vnější nejkratší vzdálenosti mohou být menší než vzdálenosti uvedené v této normě. Ostatní požadavky normy mohou být pro vedení s izolovanými vodiči použity. V platnosti od prosince 2002.

### **ČSN P CEN/TS 15280**

Obsahem této normy je technická specifikace pro katodicky chráněná potrubí uložená v půdě, jež ovlivňují střídavé trakční systémy a/nebo rozvodná vedení střídavého napětí. Skýtá meze, postupy měření, informace týkající se dlouhodobé interference střídavým proudem a hodnocení pravděpodobnosti koroze střídavými proudy, zjednodušený popis procesu koroze střídavými proudy a úvahy ohledně navrhování katodické ochrany. Tato norma nabyla platnosti od června roku 2007.

### **ČSN 03 8373**

Předepisuje zásady na řízení provozu, údržby a revize ochrany proti korozi kovových potrubí a kabelů s kovovým pláštěm, které jsou uloženy v zemi a v povrchových vodách, pokud pro zařízení neplatí předpisy přísnější. Neplatí pro litinová potrubí, jež nejsou opatřena izolací podle ČSN 03 8375 (čl. 63). ČSN 03 8373 byla schválena 15. 3. 1976 a v účinnost vešla 1. 12. 1977.

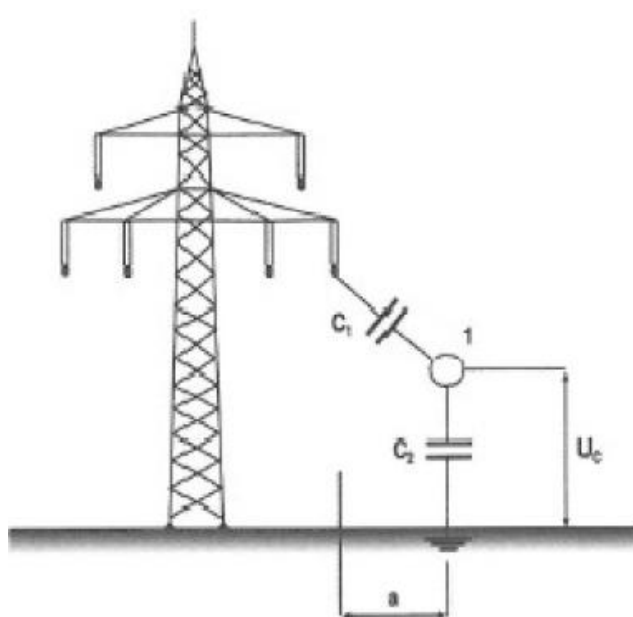


### 3 Vliv střídavých rozvodných systémů (linky vvn a zvn) na úložná zařízení

V okolí venkovních vedení vysokého napětí mohou být ocelová potrubí vystavena vlivu kapacitnímu, induktivnímu nebo galvanickému. Charakter vlivu se posuzuje podle toho, zda se jedná o indukci elektromagnetismem nebo o galvanický vliv při vzniku zkratových proudů, eventuálně jejich různé kombinace [3].

#### 3.1 Kapacitní vliv

Napětí v elektrickém rozvodném systému je příčinou naindukovaného střídavého napětí v ocelovém potrubí. Jedná se o formu kapacitní vazby, kterou udává kapacita mezi fázovými vodiči venkovního nadzemního vedení a potrubím a kapacita mezi potrubím a půdou, která je obklopuje. Pokud bude například potrubí uloženo během výstavby na izolovaných podpěrách, je možné očekávat při souběhu s vedením vvn, které je pod napětím, vznik životu nebezpečných napětí v důsledku kapacitní vazby. Tato napětí mohou dosahovat až několik kV do vzdálenosti přibližně 100 m od krajního vodiče linek elektrického vedení.



$C_1, C_2$  – kapacita

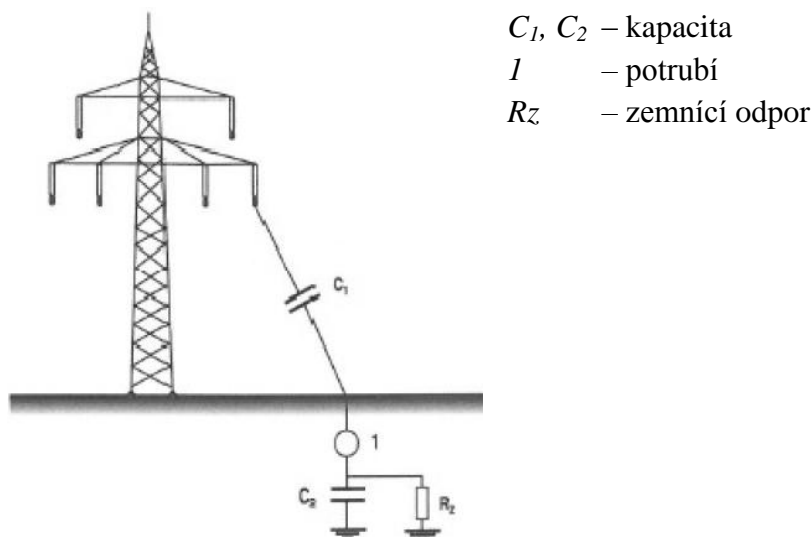
$l$  – potrubí

$a$  – vzdálenost potrubí ke kolmému průmětu od krajního vodiče

Obr. 2. Kapacitní vazba – výstavba nového potrubí [3].

Při delších vzdálenostech svařených úseků potrubí je zde riziko úrazu elektrickým proudem tekoucím přes ně. Z toho důvodu je nutné opatřit vozidla s pryžovými pneumatikami pohybující v blízkosti vvn a zvn vlečnými řetězy a potrubí po každých 100 metrech uzemnit (např. 1 m dlouhou zemnicí tyčí). Pro spojení je vhodné měděné izolované lano s průřezem minimálně 16 mm<sup>2</sup>. Tato opatření nebezpečí kapacitní vazby omezí na bezpečné hodnoty.

Po uložení potrubí do země se kapacita vlivem zemního odporu sníží na minimum. Kapacita je tedy s výjimkou doby výstavby potrubí zanedbatelná (viz obr. 3).



Obr. 3. Kapacitní vazba – potrubí v zemi [3].

### Meze nebezpečných kapacitních vlivů

Pro tento vliv je dle normy [4] stanovena ukazatelem meze nebezpečných vlivů efektivní hodnota proudu procházejícího lidským tělem v případě dotyku. Hodnota proudu, který se nesmí překročit, je 10 mA. Této hodnoty se docílí uzemněním potrubí. Kontrola výpočtem není nutná [3].

## 3.2 Induktivní vliv

Tento vliv se vyskytuje nejčastěji. Z I. Maxwellovy rovnice a materiálového vztahu lze dosvědčit, že magnetická indukce je funkcí proudu. Naindukované střídavé napětí v kovovém potrubí je funkcí proudu fázového, který protéká vodiči venkovního vedení. Střídavý proud protékající vodičem vytváří kolem tohoto vodiče elektromagnetické pole, jež se šíří v jeho okolí (vzduch, půda). Toto pole pulzuje o frekvenci 50 Hz 100x za sekundu. Vzniklé pole bude protínat potrubí ležící v blízkosti elektrického vedení, a to má za následek indukování napětí do půdy a potrubí.

Stálý nebo poruchový proud elektrickým vedením je za těchto podmínek příčinou vzniku potenciálu na potrubí vůči zemi. Tím může být následováno zranění pracovníků elektrickým proudem, porušení systému katodické protikorozi ochrany, poškození spojů izolace, potrubní izolace a poškození jiných, zejména elektronických zařízení, která jsou prvkem potrubí.

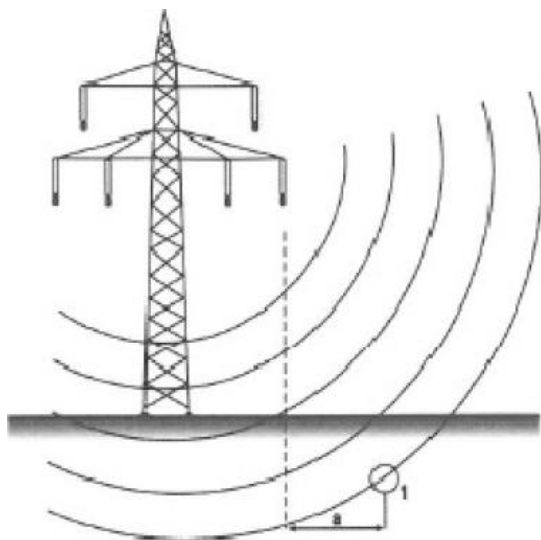
### ***Systém katodické ochrany***

*Způsob ochrany zařízení (z oceli, mědi, mosazi, hliníku) proti elektrochemické korozi, která je způsobena vodivým spojením dvou nebo více materiálů s různým elektrodovým potenciálem. Rozdílné potenciály vznikají nejčastěji působením bludných proudů (ty má na svědomí například stejnosměrně elektrizovaná železnice) na kovová úložná zařízení v zemi.*

Ochranu lze provést dvěma způsoby katodické polarizace:

- 1) Připojením chráněného zařízení na záporný pól vnějšího elektrického zdroje.
- 2) Spojením s kovem – obětovanou anodou, jež má zápornější elektrochemický potenciál než chráněný kov, který se pak stává anodou [8].

Úroveň ovlivnění se posuzuje především podle velikosti, která se určuje výpočtem, napětí indukovaného na potrubí vůči zemi. Případný vliv lze vyloučit dostatečnou vzdáleností mezi potrubím a vedením vvn již při stavbě nového ocelového potrubí.



$l$  – potrubí  
 $a$  – vzdálenost potrubí ke kolmému průmětu od krajního vodiče

Obr. 4. Induktivní vliv na potrubí [3].

V ideálním případě, kdy by ve všech fázích vedení vvn byly konstantní proudy a všechny tři vodiče byly stejně vzdáleny od osy potrubí, nevznikalo by pak žádné indukované napětí. Ve skutečnosti tomu tak bohužel není, jak z hlediska symetrického rozložení, tak z hlediska velikosti proudů v každé fázi, tudíž vznikají indukovaná napětí.

Při běžném provozu energetické sítě jsou tato napětí relativně stálá. Praktická měření ukázala, že napětí dosahují hodnot až několik desítek voltů. Tyto hodnoty však mohou za určitých okolností přesahovat maximální přípustné dotykové napětí. Stane-li se tak, je nutné učinit náležitá opatření k jejich potlačení. Nejvyšší hodnoty se zpravidla naměří tam, kde se potrubí odklání od elektrického vedení, a tam, kde je provedena cyklická záměna fází na stožáru.

V současnosti se již při projektování potrubních systémů zjišťuje, zda se nenachází v oblasti vlivu venkovních vedení. Pokud tomu tak je, je nutno počítat ideální indukované napětí na celou trasu. Překročí-li se dvojnásobek ideálního napětí indukovaného napětí  $U_i$ , je nutno spočítat potenciál potrubí-půda, jenž nesmí přesáhnout maximální dovolené napětí [3].

Ideální indukované napětí se určí podle vzorce z [3]:

$$U_i = 2\pi f \cdot |M| \cdot I_k \cdot w \cdot r_z \cdot l \cdot 10^{-6} \text{ [V/km]} \quad (3.1)$$

kde:

$M$ [ $\mu\text{H/km}$ ]	součinitel vzájemné indukčnosti mezi dvěma vodiči se zpátečním vedením zemí
$I_k$ [A]	1f zemní zkratový proud protékající vedením
$l$ [km]	délka výpočetního úseku; kolmý průmět daného úseku potrubí na osu vedení
$w$ [-]	činitel pravděpodobnosti určující zatížení sítě, nasazení jednotek v elektrárnách
$r_z$	redukční činitel zemnicích lan

Při výpočtech ideálního napětí se nebere v potaz součinitel šíření (hodnoty činného odporu potrubní linky, indukčnosti, kapacity a průměrné vodivosti izolace). Tyto parametry jsou obsaženy ve vztahu z [3] pro výpočet potenciálu:

$$U_{pmax} = \frac{U_i}{2|\gamma|} |(1 - e^{-\gamma})|, \quad (3.2)$$

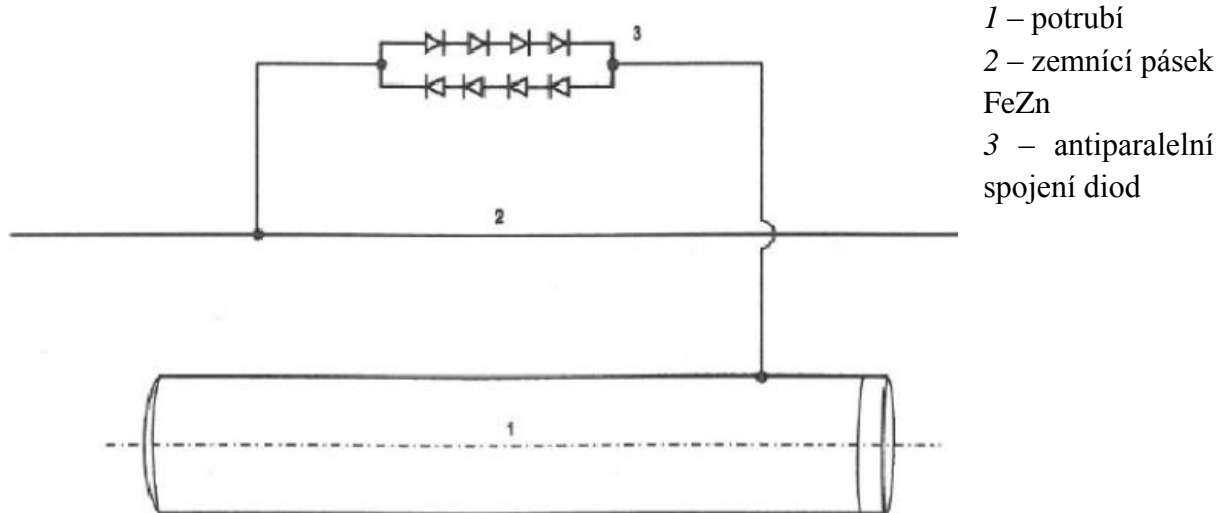
kde:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad [1/\text{km}] \quad (3.3)$$

$R$ [ $\Omega/\text{km}$ ]	měrná rezistence potrubí
$\omega L$ [ $\Omega/\text{km}$ ]	měrná reaktance potrubí
$\omega C$ [S/km]	měrná susceptance izolovaného potrubí
$G$ [S/km]	měrná konduktance izolovaného potrubí
$\gamma$ [1/km]	konstanta šíření

Při překročení přípustného dotykového napětí při poruchových stavech, nebo trvalého napětí při běžném provozu, musejí být vzniklé proudy odvedeny do země, a tím i zpět ke zdroji. Klasické uzemnění bohužel nestačí, neboť to je v rozporu s funkcí katodické ochrany, pro jejíž korektní chod se vyžaduje naopak naprosté odizolování od země.

Tento problém se řeší v ČR nejčastěji použitím uzemnění přes polovodičové diody v antiparalelním zapojení (viz obr. 5). Počet diod v jednom směru je volen tak, aby vznikl úbytek okolo 3 V. Pokud napětí překročí zmiňovanou mez, stávají se diody vodivými a potrubí se uzemní. Jako zemnič je používána chránička nebo samostatný zemnicí pásek. V současnosti se již vyrábí a aplikují zapouzdřené moduly, které obsahují různé počty diod v antiparalelním zapojení.



Obr. 5. Příklad uzemnění potrubí přes diody [3].

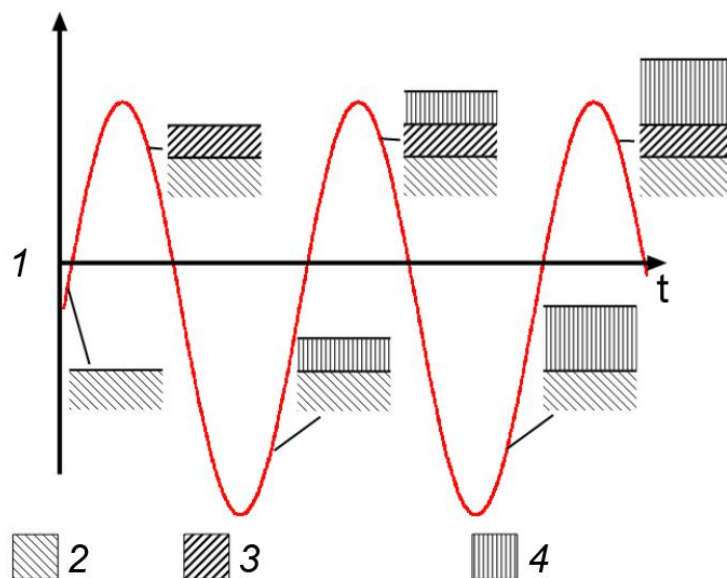
### 3.3 Galvanický vliv

Galvanický vliv se projevuje při zkratu rozvodného systému, kdy zkratový proud teče jednou fází přes stožár do země, respektive přes zemní lano zpátky ke zdroji (rozvodna, elektrárna). V tomto případě dosahuje zkratový proud v jedné fázi 20násobek až 40násobek jmenovitého proudu, přičemž proudy v ostatních fázích se blíží nule.

### 3.4 Koroze indukovanými střídavými proudy

V přítomnosti naindukovaného napětí na katodicky chráněných úložných zařízeních může vlivem impedance systému vzniknout indukovaný proud, který je závislý jak na velikosti indukovaného napětí, tak na již zmiňované impedanci systému. Indukovaný proud tekoucí malými skulinami izolace, které jsou způsobeny její pórovitostí, do země, má za následek vznik koroze.

Proces koroze střídavým proudem je zjednodušeně znázorněn na obr. 6. Při anodické (kladné) půlplně střídavého proudu, kdy proud vystupuje z kovového zařízení do půdy, holý kovový povrch v místě defektu oxiduje, a tím se vytvoří povrchový oxidační film. Při katodické (negativní) půlplně, kdy střídavý proud vstupuje zpět do kovového zařízení, se oxidační film redukuje a mění na vrstvu rzi, která nedisponuje ochranným efektem. V následném anodickém cyklu se vytváří další oxidační film, který je opět při katodické půlplně redukován a přeměněn na vrstvu rzi. Tím množství rzi postupně narůstá. Pokud by se tento proces rozpouštění oxidační cesty opakoval během každé anodické půlplně, hrozila by rychlost koroze až 100 mm/rok, což je nepřijatelné, a proto je třeba podzemní zařízení určitým způsobem chránit.



Obr. 6. Znázornění korozního procesu střídavým proudem  
(1 – proud, 2 – kov, 3 – pasivní film (např.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), 4 – hydroxid železa) [7].

Dle současných studií velikost proudové hustoty způsobující korozi začíná na 20–30  $\text{A}/\text{m}^2$ . Za již velmi nebezpečnou velikost se udává hodnota okolo 100  $\text{A}/\text{m}^2$ .

Nejjednodušší prevence proti korozi indukovanými proudy je dostatečná vzdálenost potrubí od venkovních vedení. K prevenci dále přispívá kvalitní izolace a uzemnění po stanovených úsecích viz kapitola 3.2 [7].



Obr. 7. Příklad koroze způsobené malým defektem v izolaci [7].

## 4 Vliv stejnosměrně elektrizovaných soustav na úložná zařízení

Na úložná zařízení má vliv nejen střídavá elektrizovaná soustava, ale také stejnosměrný trakční systém, který se používá pro napájení vlakových, tramvajových a podzemních tratí. Tento systém elektrizace se zavedl již roku 1955, kdy byla uvedena do provozu první železniční trať Praha-Česká Třebová. Bylo tak učiněno z důvodu, že pro trakci se jevil jako velmi výhodný stejnosměrný sériový motor. Lokomotiva se stejnosměrným motorem byla nejjednodušší na výrobu a navíc měla velmi dobré trakční vlastnosti. K ss elektrizaci přispěl také fakt, že v této době výkonová polovodičová elektronika prakticky neexistovala. Elektrizace stejnosměrnými trakčními proudovými soustavami s sebou však nese i určité problémy, a to elektrochemickou korozi bludnými proudy.

Kromě uměle vyvolaných zemních proudových polí, která má na svědomí činnost člověka, existují v přírodě ještě přirozená zemní proudová pole, jež také do určité míry kovová úložná zařízení ovlivňují. Jejich výskyt je však na činnosti člověka nezávislý [9].

### 4.1 Přirozená zemní proudová pole

Tato elektrická pole jsou výsledkem skládání regionálních a lokálních elektrických polí. Regionální pole zabírají celý povrch Země či jeho podstatné části. Lokální se rozprostírají pouze na malém úseku zemského povrchu.

V zemi tedy narážíme na přirozené proudy, které vznikají elektrochemickou aktivitou hornin (např. ložiska kovových rud). Tyto proudy nejsou však silné a jejich šíření jen ojediněle překračuje několik stovek metrů. Intenzita elektrického pole se pohybuje okolo 10 mV/m [9].

### 4.2 Umělá zemní proudová pole

Vznik umělých zemních proudových polí je spjato se vznikem bludných proudů, které se dostávají do půdy z důvodu nedostatečně odizolovaného vodiče od země nebo ze zařízení, které užívá zem jako zpětný vodič. Takto vytvořená proudová pole jsou z hlediska vzniku elektrochemické koroze úložných zařízení nejnebezpečnější.

Vodivost zeminy určuje, do jakých vzdáleností (řádově stovky metrů až kilometry) se tok stejnosměrného proudu rozšíří od míst, kudy by měl správně téci. Při malé vodivosti je teritorium, kam zasahují, velké a naopak, při dobré vodivosti je jejich rozptyl menší.

Nazýváme je bludnými proudy, neboť jejich směr se nedá přesně stanovit. Pro střídavé proudy vyvolané elektromagnetickou indukcí z nadzemních vedení se také v literatuře užívá termín střídavé bludné proudy, jejich směr šíření je však přibližně znám, a to souběžně s trasou nadzemního vedení.

Nejvíce vyskytujícími se zdroji ss bludných proudů jsou:

- Stejnoseměrně elektrizované dráhy využívající kolejnice, které nejsou dostatečně izolované od země (hlavně v těch místech, kde přechodový odpor mezi kolejí a zemí dosahuje hodnot menších než předepsaných  $r_p = 0,5 \Omega km$ ), jako zpětné vodiče trakčních proudů.
- Stejnoseměrné rozvody v průmyslových podnicích, ve kterých se pracuje s elektrickými svářecími agregáty.
- Zařízení na aktivní protikorozní ochranu. Jedná se o interferenční proudy vznikající mezi úložnými zařízeními, které nejsou připojeny ke společnému zdroji vnějšího ss proudu katodické ochrany. Potlačení interferencí se provádí projektováním aktivní ochrany pro všechna úložná zařízení v dané oblasti společně [9].

### 4.3 Elektrochemická koroze způsobená vlivem bludných proudů

Česká republika se řadí mezi země s velmi vysokou hustotou železničních tratí (většina z nich je u nás elektrizována stejnosměrně). Můžeme říci, že tato síť zabírá území bezmála poloviny naší republiky (berou-li se v úvahu i sítě pro tramvaje a metro). Z předešlého lze soudit, že hustota proudových polí vznikajících kolem zmiňovaných sítí bude také nabývat vysoké hodnoty. Nachází-li se kovové zařízení uložené v zemi v dosahu nežádoucích proudových polí a není účinně chráněno, je na vzniku elektrochemická koroze. Její intenzita se zpravidla snižuje s rostoucí vzdáleností od zdrojů proudových polí.

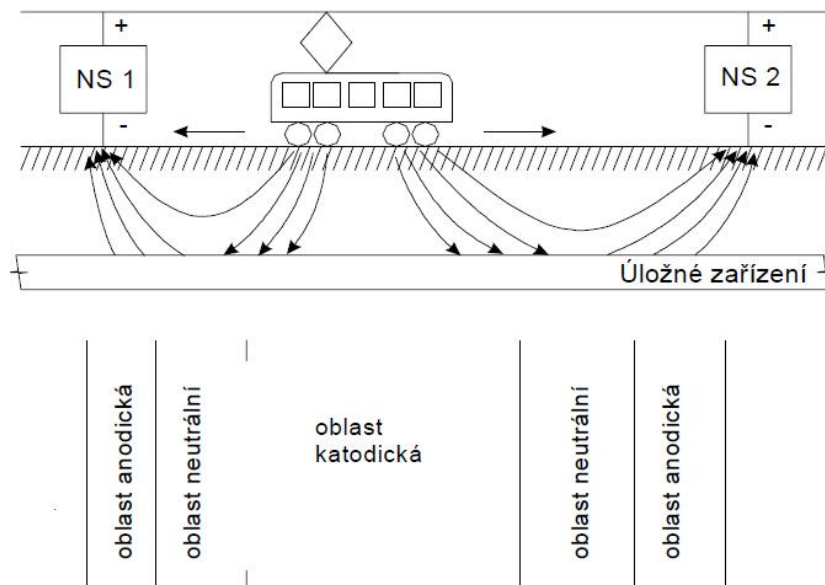
Dnešní napájení kolejových drah se ustálilo na užívání jednovodičového přívodu elektrického proudu z trakčních napájecích stanic přes nadzemní trolej (ojediněle přes izolovanou kolejnici) do hnacích vozidel a jeho odvodu přes kolejnice zpět.

V ČR se kladný potenciál ss proudu přivádí na trolejový drát a záporný na kolej. Izolace kolejnic od půdy však není příliš dokonalá, poněvadž se kolejnice pokládají pouze na pražce, které mají jako svůj podklad štěrk, a to může zapříčinit v oblastech s malým měrným odporem půdy svod zpětných proudů do země. Vyskytující se nedokonalost je však zároveň i nutností. Důvodem je zamezení vzniku příliš vysokého spádu napětí mezi kolejemi a zemí, který by mohl znamenat určité nebezpečí pro cestující. Takto je poměrně vysoká část nebezpečného zpětného proudu (15–60 %) odváděna do země a uživatelům již nebezpečí nehrozí.

Pokud jsou však v blízkosti drah uloženy v zemi rozměrně větší vodivé předměty (např. kovová potrubí, kovové pláště kabelů a nádrže, podzemní zdroje vody), lze předpokládat, že díky své dobré podélné vodivosti mohou shromažďovat a vést bludné proudy z okolí do značných vzdáleností i přes fakt, že nejsou přímo spojené s kolejemi. Elektrický proud se pak vrací do měřírny kolejemi, podzemním vedením a půdou namísto pouze kolejemi. To má za následek vznik velkého množství katodických a především anodických oblastí.



Obr. 8 názorně ukazuje přechod proudu z kolejnic do země a úložného zařízení, ze kterého následně vychází v blízkosti napájecí stanice (NS) do země.



Obr. 8. Znázornění trakčního proudu tekoucího zpět k napájecím stanicím [9].

Potenciálové oblasti:

- Oblast katodická se nachází v místech, kde vstupuje proud z okolní půdy do podzemního zařízení. Elektrochemická koroze pro tuto oblast není nebezpečná. Na úložném zařízení, které se chová jako anoda, však vzniká vodík, jehož vlivem dochází ke křehnutí materiálu, což vede ke zmenšení pevnosti (velice nebezpečné u plynovodů).
- Oblast neutrální představuje místa, kde bludné proudy pouze tečou úložným zařízením. Elektrochemická koroze zde také není nebezpečná.
- Oblast anodická je v místě, ve kterém vystupují bludné proudy z úložného zařízení zpět do půdy. Zde vzniká značné nebezpečí z hlediska elektrochemické koroze. Tato oblast je důkladně hlídána a sledována měřeními. Dochází tu k elektrolytickému rozpouštění kovů, jehož projevem je bodové proděravění kovu, přičemž kov je v místě poruchy bez rzi [9,10].

## 4.4 Opatření pro omezení vzniku bludných proudů

K omezení vzniku bludných proudů lze provést hned několik opatření:

- Navýšení odporu na přechodu kolej-zem.  
Řešení je však v rozporu s předchozí kapitolou, přesněji svod proudu do země kvůli bezpečnosti cestujících. Přechodný odpor musí být takové velikosti, aby dovolil určité části proudu vtéci do země, ale zase neohrozil úložné zařízení. Tento odpor musí být minimálně  $0,5 \Omega \text{km}$ .
- Navýšení elektrické vodivosti kolejnic. Viz předchozí.
- Minimalizování vzdáleností mezi napájecími stanicemi. Z kratší vzdálenosti vyplývá menší odpor trakčního obvodu, což znamená i menší únik proudů z kolejí do země.
- Způsob napájení trakční sítě. Nejméně výhodné z hlediska úniku proudu z kolejnic do země je napájení jednostranné, při kterém se vracejí proudy od hnacího vozidla jen jednou cestou. Další způsoby napájení jsou dvojstranné a čtyřstranné, při kterých se proud vrací dvěma cestami. Při čtyřstranném, nejvýhodnějším, mohou být navíc propojeny sousední koleje, což vodivý průřez kolejí zvyšuje několikanásobně.
- Provoz napájecí soustavy s co nejvyšším napětím. Je výhodné přenášet žádané výkony s co nejvyšším napětím, a tím snížit proudy v kolejích na minimum, což zajišťuje i minimalizaci bludných proudů [9].

## 4.5 Základní ochrany úložných zařízení

### Pasivní ochrany

Opatření, která brání vstupu a výstupu bludných proudů do podzemních zařízení a ze zařízení, nebo omezují jimi tekoucí proud.

Řadíme mezi ně například:

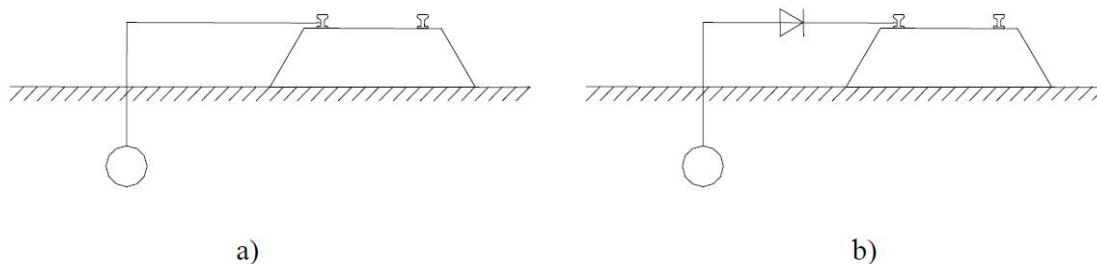
- Asfaltové, plastické a různé speciální izolace.
- Ochrana uložením do kanálů
- Obsyp zařízení nevodivou zeminou, šterkem nebo pískem.
- Trasy úložných zařízení volené co nejdále od zdrojů bludných proudů a zemin s vysokou vodivostí.

### Aktivní ochrany

Zajišťují trvalý záporný potenciál úložného zařízení, který zamezuje vzniku anodických oblastí, a odvod proudů z nich pouze v místech připojení ochrany. Je to však jen ochrana doplňková předpokládající dokonalou pasivní ochranu.

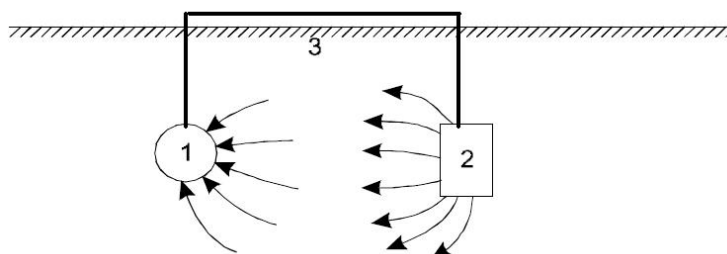
Řešení aktivní ochrany se provádí několika způsoby:

- Přímé drenážování. Jeho provedení je nejjednodušší z aktivních ochran, ale nejméně se používá. Provádí se přímým spojením úložného zařízení s kolejnici. Nelze použít na kolejnici, u kterých se mění polarita napětí.
- Polarizované drenážování. Podobné přímému, avšak zde je navíc dioda, jež nepropustí proud tekoucí z koleje do podzemního zařízení.



Obr. 9. Drenážování (a – přímé, b – polarizované) [9].

- Vodivé spojení úložného zařízení s obětní anodou, kterou tvoří slitiny kovů s vysokým záporným potenciálem (Mg, Zn, Al). Spojení tvoří člunek, kde podzemní kovové zařízení funguje jako stálá katoda a obětní elektroda jako anoda. Nelze ji použít v místech s vysokou hustotou zemních proudů (blízko elektrických tratí). K určení velikosti a hmotnosti obětní elektrody je nutné znát před instalací přibližnou dobu působení ochrany.



Obr. 10. Zapojení obětní anody (1 – úložné zařízení, 2 – obětní anoda, 3 – izolovaný vodič) [9].

- Katodická protikorozní ochrana. Nejrozšířenější způsob ochrany. Princip je vysvětlen již v kapitole 3.2.

Použití aktivních ochran, které je nutné připojit ke kolejnici, je limitováno hlavně jejich případným negativním vlivem na obvody kolejového zabezpečení [9,10].

## 5 Přenosová soustava České republiky

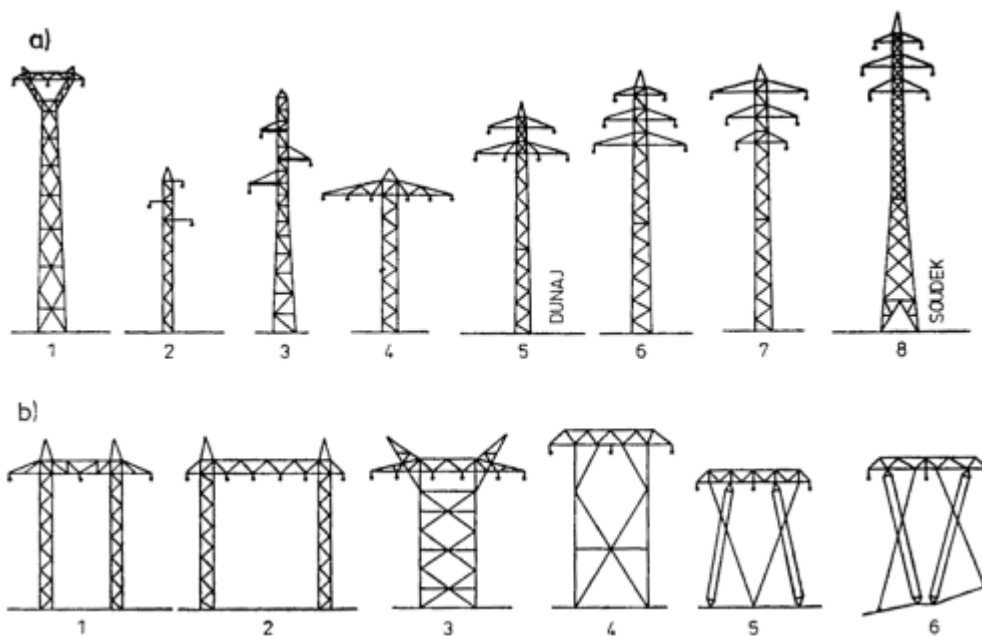
V České republice je přenos elektrické energie zajištěn akciovou společností ČEPS. Naše země disponuje „páteří“ sítí o napětí 400 a 220 kV. Zmiňovaná síť slouží k rozvedení výkonu z velkých systémových elektráren přes distribuční soustavy ke spotřebitelům na celém území ČR a zároveň je také součástí mezinárodního propojení Evropy. Přeshraničními vedeními je přenosová soustava ČR napojena na soustavy všech sousedních států, čímž synchronně spolupracuje s celou elektroenergetickou soustavou kontinentální Evropy [5].

### 5.1 Základní dělení stožárů vysokého napětí

Každý typ stožáru charakterizují především parametry vedení, jako je například napětí, výkon, vodiče a zemnicí lana, izolátory atd., dále jsou charakterizovány geometrií včetně uspořádání vodičů, zatížitelností závislé na vodičích, funkci v dané trase vedení, oblasti použití (např. oblasti s velkou pravděpodobností výskytu námrazy nebo silných poryvů větru), na konstrukci prvků a na způsobu spojování.

V praxi se stožáry vvn dělí souhrnně z hlediska velikosti přenášeného napětí:

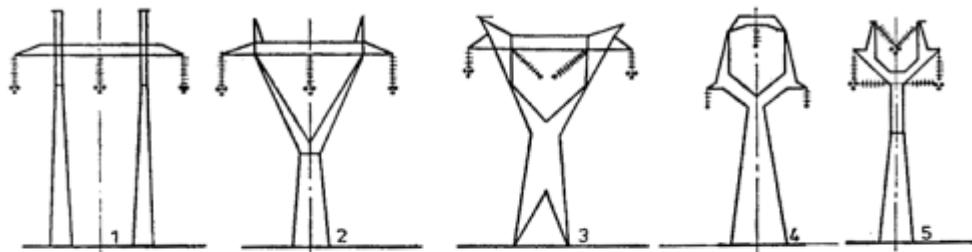
- pro napětí 110 kV, relativně lehké konstrukce
- pro napětí 220 kV, jsou podobné stožárům pro 110 kV, avšak jsou vyšší a více namáhány



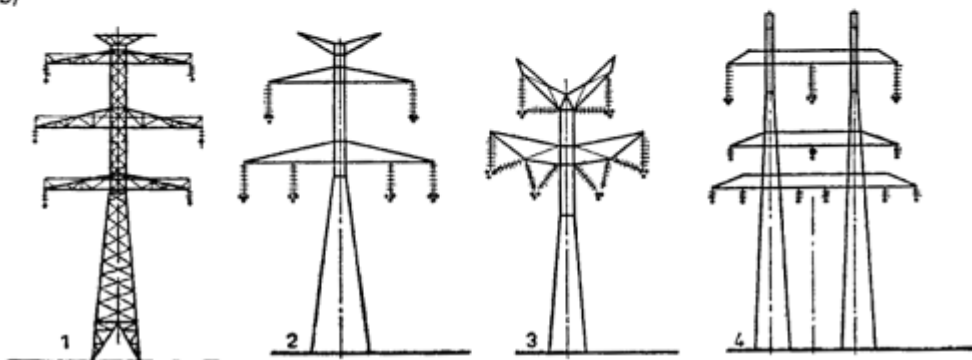
Obr. 11. Typy a tvary stožárů vedení 110 kV (220 kV) [6].

- pro napětí 400 kV, jejich konstrukce jsou již velké a těžké

a)



b)



Obr. 12. Typy a tvary stožárů pro 400 kV [6].

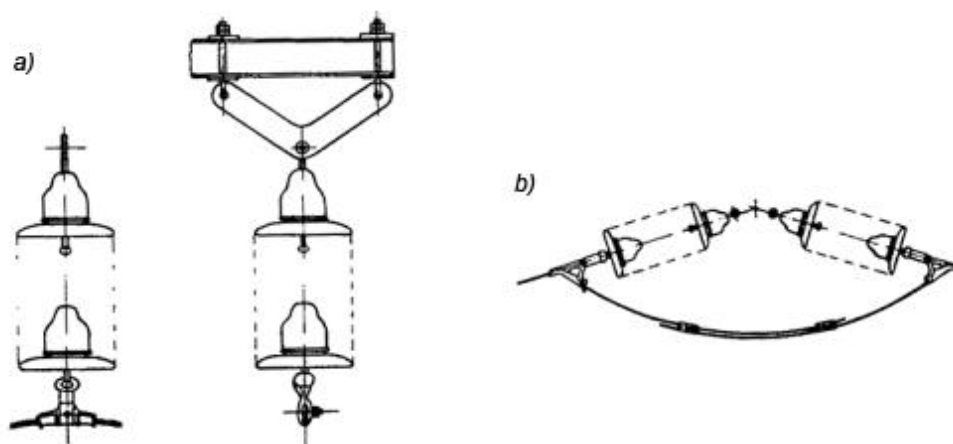
Stožáry dle funkce a polohy v trase dělíme:

- **Nosné:**

Označujeme jimi stožáry, které jsou na trase vedení umístěny v přímých úsecích mezi stožáry výztužnými. Vodiče jsou zde zavěšeny pomocí svislých izolátorových závěsů. Nosné stožáry jsou namáhány ve směru vedení pouze vodorovnou silou od tlaku větru na samotnou ocelovou konstrukci. Zpravidla je převládajícím zatížením zatížení větrem kolmo na směr vedení. Jejich počet v trase většinou převyšuje počet stožárů výztužných.

- **Výztužné (kotevní):**

Jejich účelem je vytvoření pevného bodu v trase. Jejich konstrukce je tedy robustnější než u stožárů nosných. K připevnění vodičů zde slouží kotevní izolátorové závěsy, které jsou namáhány plným tahem těchto vodičů. Každý vodič přechází přes izolátory tzv. přeponkou, která vylučuje mechanické namáhání. Kotevními stožáry je také zajišťováno napínání vodičů, z toho důvodu jejich počet a poloha závisí na postupu montáže vedení. Umísťují se většinou každých 3 až 5 km.



Obr. 13. Izolátory (a – nosný izolátorový závěs, b – kotevní závěs s přeponkou) [6].

Geometrické řešení stožárů podmiňuje hned několik kritérií.

Jejich výška je dána funkcí v trase, rozestupem mezi každým z nich, konfigurací vodičů a vzdáleností nejspodnějšího vodiče od země. Rozestupy stožárů vysokého napětí bývají od 300 do 500 m. Zejména se však nejvíce přihlíží na výšku nejspodnějšího vodiče nad zemí. Ta se při teplotních změnách a zatížení námrazou mění. Při příliš velkém průvěsu (přiblížení k zemi nebo ke stožáru) hrozí smrtelné nebezpečí pro lidi a zkrat, způsobený krátkodobým spojením se zemí nebo konstrukcí stožáru, který může způsobit vypnutí nebo i havárii vedení. Minimální vzdálenost vůči zemi udává výška přenášeného napětí a zalidnění krajiny.

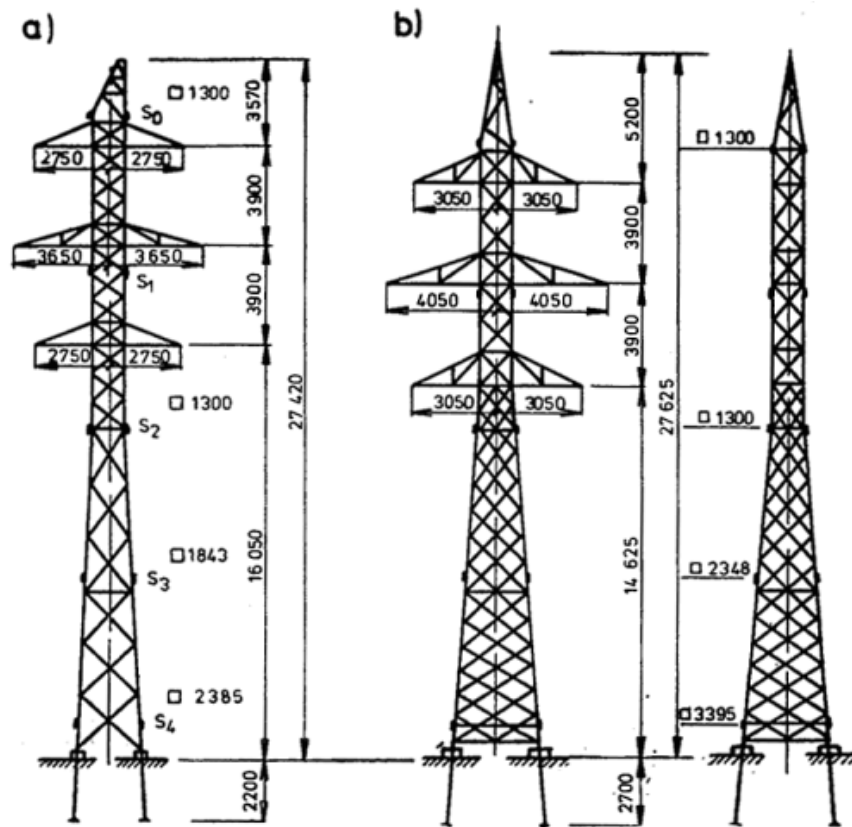
Robustnost udává úhel lomu trasy. V místech s velkými převýšeními a značnou členitostí terénu je nutné použít stožáry robustnější [6].

## 5.2 Vybrané typy venkovních stožárů vysokého napětí

Mezi nejpoužívanější typy stožárů vvn patří stožáry typu „soudek“ (pro vedení 2x110 kV) a „kočka“ (pro vedení 1x400 kV).

K jejich konstrukci se dnes používají ostrohranné válcované profily, a to především úhelníky. Dále přicházejí v úvahu trubky, pro svou velkou únosnost ve vzpěru, což by vedlo ke snížení počtu styčnicků, a tedy i úspoře materiálu. Tato úspora by se však vyvážila náklady za pracnější zpracování. Zejména kvůli obtížnému ošetření vnitřních dutin proti korozi (nátěry, žárové pozinkování) se přistupuje spíše k válcovaným profilům.

Na válcované profily se nejčastěji využívá ocel jakosti 37.

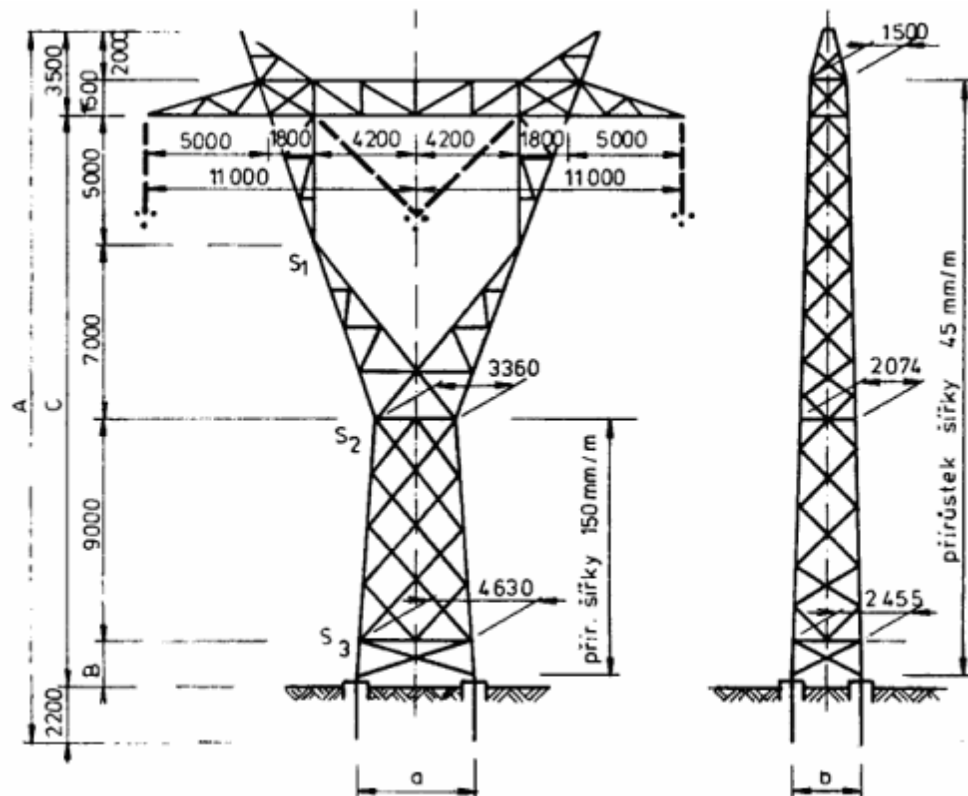


Obr. 14. Stožár typu „soudek“ pro 2x110 kV (a – nosný, b – výztužný) [6].

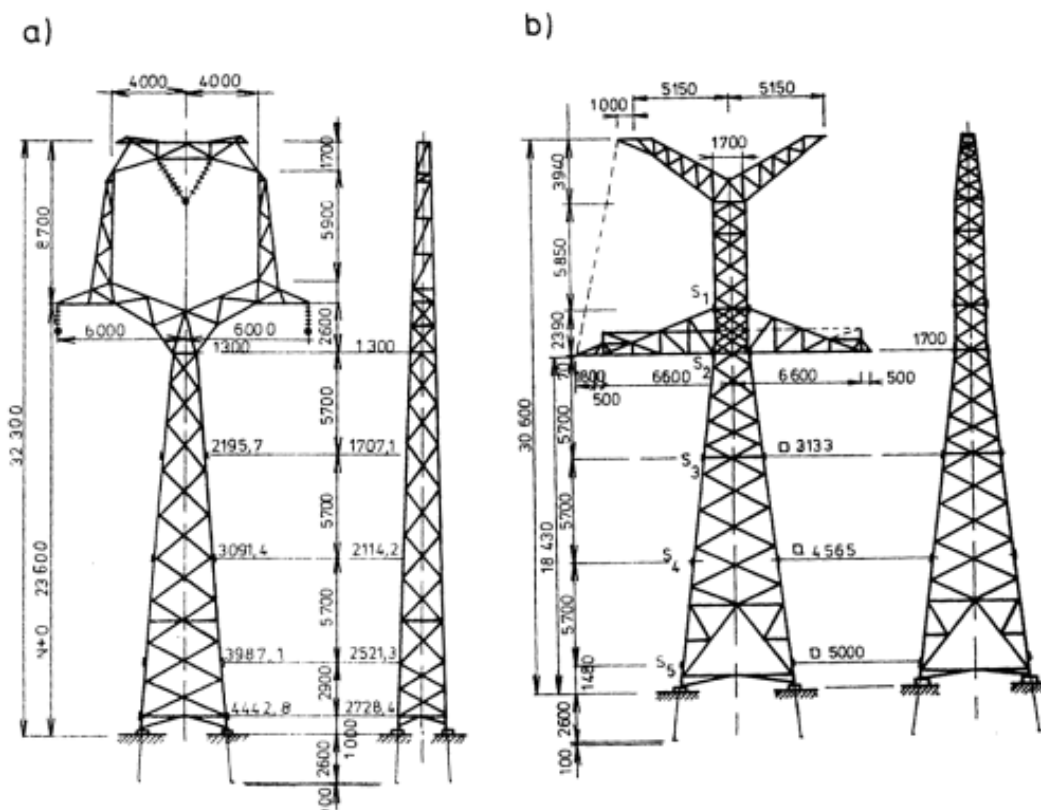
Obr. 14 představuje nosný a výztužný stožár pro 2x110 kV s těžkými vodiči 6 450 AlFe + 185 AlFe 3. Výztužný stožár, který namáhají větší ohybové momenty a kroucení, se odlišuje od nosného většími rozměry v příčném směru, silnějšími profily a násobnou výplní.

Další skupinou stožárů pro jednoduché vedení jsou stožáry s „oknem“ uprostřed. Výška samotného stožáru ovlivňuje jeho tvar. Na obr. 15 je uveden vylehčený stožár typizovaný pro vedení 400 kV z oceli Atmofix (tento druh oceli je schopný vytvořit za vhodných atmosférických podmínek postupně na svém povrchu povlak z oxidů (patiny), jenž podstatně zpomaluje rychlost koroze) [11], který umožňuje pokrýt širokou oblast potřeb stožárů a navíc u něj lze díky typizaci velmi zkrátit dobu přípravy výroby. Jejich kostra, dosahující hmotnosti až 60 t, se většinou šroubuje až na místě, čímž se odstraňují komplikace s dopravou.

Na obr. 16 je vidět uspořádání vodičů do trojúhelníku. Tomuto typu stožáru se přezdívá „kočka“. Nosná a výztužná konstrukce, jak ukazují obrázky, se velmi odlišuje [6].



Obr. 15. Vylehčený stožár z oceli Atmofix pro 1x400 kV [6].



Obr. 16. Stožár „kočka“ pro 1x400 kV (3x3 450 AlFe 6 + 2 185 AlFe 3) [6].



## 6 Vybraná úložná zařízení

Druhů a rozměrů potrubí je velmi mnoho. V mé práci se budu zabývat analýzou nežádoucích vlivů na blízké vodovody a plynovody. Hloubku jejich uložení v zemi zvolím dle [12]. Údaje jsou uvedeny v tabulce 2. Jejich rozměry, které ukazuje tabulka 3, dále zvolím dle [13].

Zařízení	Hloubka uložení [m]
Plynovodní potrubí	0,8
Vodovodní potrubí	1–1,6

Tabulka 2. Hloubka uložení úložných zařízení [12].

Zařízení	Vnější průměr trubky [mm]	Výrobní tloušťka stěny [mm]
Plynovodní potrubí	273	7
Vodovodní potrubí	273	7

Tabulka 3. Rozměry vybraných úložných zařízení [13].

Dříve nejčastěji používaným materiálem pro potrubí byla ocel, dnes se již pro rozvod vody ve velkém používají plastové hmoty, které nepodléhají elektromagnetickým a korozním vlivům. Rozvod plynu je nadále z důvodu bezpečnosti rozváděn pomocí ocelových potrubních systémů.

Zaměřím se proto v mé práci na potrubí ocelová, neboť ta podléhají oběma výše uvedeným vlivům a jsou navíc stále používána pro rozvod plynu.

Izolaci ve výpočtech neuvažuji, neboť bezporuchová izolace nemá vliv na rozložení pole v produktovou. Její přítomnost pouze zbytečně prodlužuje čas výpočtu ve výpočetním programu.

## 7 Numerické řešení vlivu venkovních vedení vvn na úložná zařízení

Magnetická pole se v dnešní době již neřeší kvůli své složitosti a časové náročnosti výpočtu analytickými metodami. Moderní technologie dovoluje využít softwarové metody, které prakticky okamžitě vypočítají a graficky zobrazí výsledek s požadovanou přesností, což řešitelům značně ulehčí práci.

Softwaru pro řešení fyzikálních polí je v současnosti velmi mnoho. V této práci byly veškeré výpočty prováděny pomocí programu Agros2D [15], jenž je vyvíjen na Západočeské univerzitě v Plzni tamními inženýry a profesory v jazyce C++. Mezi další programy patří například Quickfield [16]. Tento program má zásadní nevýhodu, a to nutnost vlastnictví uživatelské licence, jež není právě levná, což mě limitovalo k jeho užívání pouze v učebnách univerzity. Agros2D sice neskýtá tolik uživatelských funkcí jako Quickfield, vybavenost programu však pro mé výpočty zcela vystačuje.

Uživatelské rozhraní programu Agros2D je z mého pohledu velmi přívětivé. Celý program je napsán v českém jazyce, k dispozici je navíc online nápověda. Ta je napsaná přehledně, ale pouze v angličtině.

Samotný návrh řešeného problému probíhá v několika krocích. Nejdříve se vytváří model s definovanými geometrickými rozměry, následuje volba materiálu a jeho vlastností, zvolí se okrajové podmínky a poté se již provádí generace výpočetní sítě (meshování). Konečné vyhodnocení probíhá po nastavení parametrů a přesnosti požadovaného výsledku. Doba výpočtu je limitovaná již zmíněnými nastaveními parametrů a přesností, které by se měly volit úměrně k výkonu PC, na němž výpočet probíhá.

### 7.1 Matematický model

Při pomalých časových změnách, kam lze zařadit pole o frekvenci 50 Hz, je možno zanedbat posuvný proud (daný druhým členem pravé strany v první Maxwellově rovnici). V tomto případě první a druhá Maxwellova rovnice (kapitola 1.3) nabývají tvaru

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (7.1)$$

Je uvažován kartézský souřadnicový systém. V jednotlivých oblastech je předpokládáno lineární prostředí, tj.  $\mu = \text{konst.}$ ,  $\gamma = \text{konst.}$  Dále je uvažován harmonický průběh proudu, což umožňuje přejít na symbolicko-komplexní zobrazení.

Využijeme rovněž materiálové vztahy (1.7) a (1.9) a vztah pro vektorový magnetický potenciál

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A} \quad (7.2)$$

Rozložení elektromagnetického pole je pak možno popsat parciální diferenciální rovnicí pro fázor magnetického vektorového potenciálu  $\underline{A}$  ve tvaru:

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot}\underline{A}) + j\omega\gamma\underline{A} = \underline{J}_{ext} \quad (7.3)$$

Rovnice, dle které aplikace řeší daný problém, je následující (obr. 19):

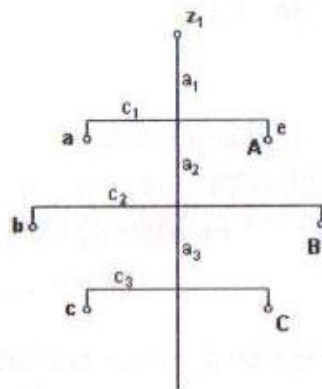
$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} (\text{rot}\underline{A} - \underline{B}_t) \right) - \sigma \underline{v} \times \text{rot}\underline{A} + j\omega\sigma\underline{A} = \underline{J}_{ext}. \quad (7.4)$$

Některé členy této rovnice budou nulové (viz rovnice 7.3),  $\sigma$  zde odpovídá měrné vodivosti  $\gamma$  [S/m].

## 7.2 Vstupní parametry pro výpočet

Výpočty v mé práci jsou následně provedeny pro stožáry typu „soudek“ a „kočka“. Parametry stožáru typu „soudek“ volené dle [14] uvádí tabulka 4, typu „kočka“ volené dle [6] uvádí tabulka 5. Vodiče pro první typ stožáru jsou: 6 450 AlFe + 185 AlFe 3, pro druhý typ: 3x3 450 AlFe 6 + 2 185 AlFe 3. Nosných stožárů je na trase několikanásobně více, proto hodlám řešit problematiku právě pro jejich rozměry. Zvolená napětí 110 kV a 400 kV jsem vybral z důvodu, že na nižších hladinách sice také vznikají určitá elektromagnetická pole, která indukují do potrubí střídavé proudy, jejich velikosti jsou však zanedbatelné. Tudíž se budu věnovat pouze zmiňovaným hladinám vvn.

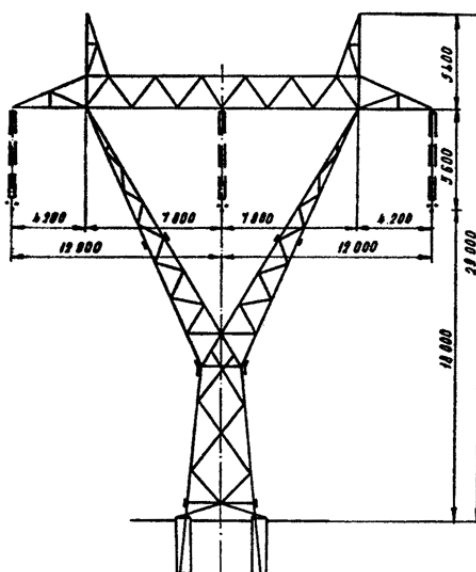
Materiálové vlastnosti a rozměry potrubí jsou uvedeny již v kapitole 6.



Obr. 17. Stožár typu „soudek“ [14].

Typ stožáru	Napětí [kV]	Rozměry [m]										
		a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	e	h <sub>a-A</sub>	h <sub>b-B</sub>	h <sub>c-C</sub>	H <sub>z1</sub>
Soudek (nosný)	2x110	3,3	3,4	3,4	2,5	3,4	2,6	1,36	21,4	18	14,6	24,7

Tabulka 4. Rozměry zvoleného stožáru pro řešení nebezpečných vlivů vedení 2x110 kV [14].



Obr. 18. Šroubovaný nosný stožár typu „kočka“ [6].

Typ stožáru	Napětí [kV]	Rozměry [m]				
		Výška svazku vodičů nad zemí	Vzdálenost mezi svazky vodičů	Výška zem. lan nad zemí	Vzdálenost mezi zem. lany	Vzdálenost vodičů ve svazku (délka strany rovnostranného trojúhelníku)
Kočka (nosný)	1x400	18	12	29	15,6	0,35

Tabulka 5. Rozměry zvoleného stožáru pro řešení nebezpečných vlivů vedení 1x400 kV [6].

Nominální hodnota proudu je určena z přirozeného výkonu

$$P = \frac{3 \cdot U^2}{Z_v} \quad [\text{W}] \quad (7.5)$$

kde  $Z_v$  je vlnová impedance, která se u vedení vvn pohybuje od 250 do 500  $\Omega$ . U vedení 110 kV počítám s nominální hodnotou proudu 160 A, u vedení 400 kV pak s hodnotou 800 A.

Seznam dalších použitých parametrů uvádí následující tabulka.

Veličina	Hodnota
Frekvence napětí v síti	50 Hz
Relativní permeabilita vzduchu	1 [-]
Relativní permeabilita plynu	1 [-]
Relativní permeabilita půdy	1 [-]
Relativní permeabilita písku	1 [-]
Relativní permeabilita vody	0,999 991 [-]
Relativní permeabilita hliníku	1,000 023 [-]
Relativní permeabilita oceli	8 000 [-]
Relativní permeabilita mědi	0,999 990 [-]
Relativní permeabilita olova	0,999 983 [-]
Měrná elektrická vodivost vzduchu	0 S/m
Měrná elektrická vodivost plynu	0 S/m
Měrná elektrická vodivost půdy	0,1 S/m
Měrná elektrická vodivost písku	0,5 mS/m
Měrná elektrická vodivost vody	40 mS/m
Měrná elektrická vodivost hliníku	37 MS/m
Měrná elektrická vodivost oceli	500 kS/m
Měrná elektrická vodivost mědi	56 MS/m
Měrná elektrická vodivost olova	4,8 MS/m

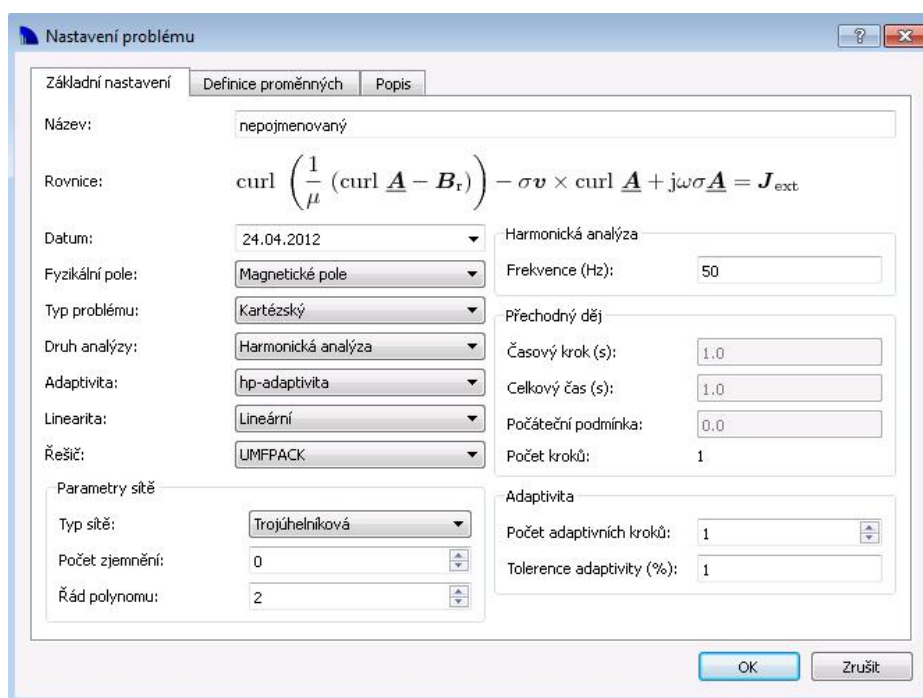
Tabulka 6. Použité parametry pro numerický výpočet.

### 7.3 Numerický výpočet pro stožár typu „soudek“

Ke zvýšení účinnosti přenosu energie se realizují transpozice vodičů, čímž se dosáhne symetrizace parametrů vedení. U dvojitých vedení (například „soudek“ 2x110 kV) existuje celkem 36 možných kombinací fázových vodičů, z nichž je 6 základních, zbylé jsou jejich modifikace.

Budu se zabývat pouze šesti základními. Z důvodu velké časové náročnosti výpočtů ve výpočetním programu simulují pouze pro kladné hodnoty souřadnic na ose  $x$ , přičemž osu  $y$  tvoří osa stožáru venkovního vedení. Pracovní oblast volím dostatečně velkou, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků (hranice jsou 82 a -82 m na ose  $x$ , 42 a -31 m na ose  $y$ ).

Všechny výpočty byly provedeny za stejného nastavení programu, jenž jsem po řadě zkušebních výpočtů stanovil tak, aby za rozumný čas celkového řešení dosahovaly výsledky poměrně přesných hodnot. Nastavení ukazuje obr. 19.

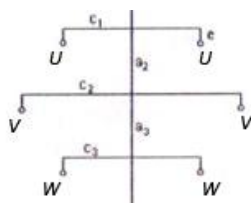


Obr. 19. Nastavení simulačního programu.

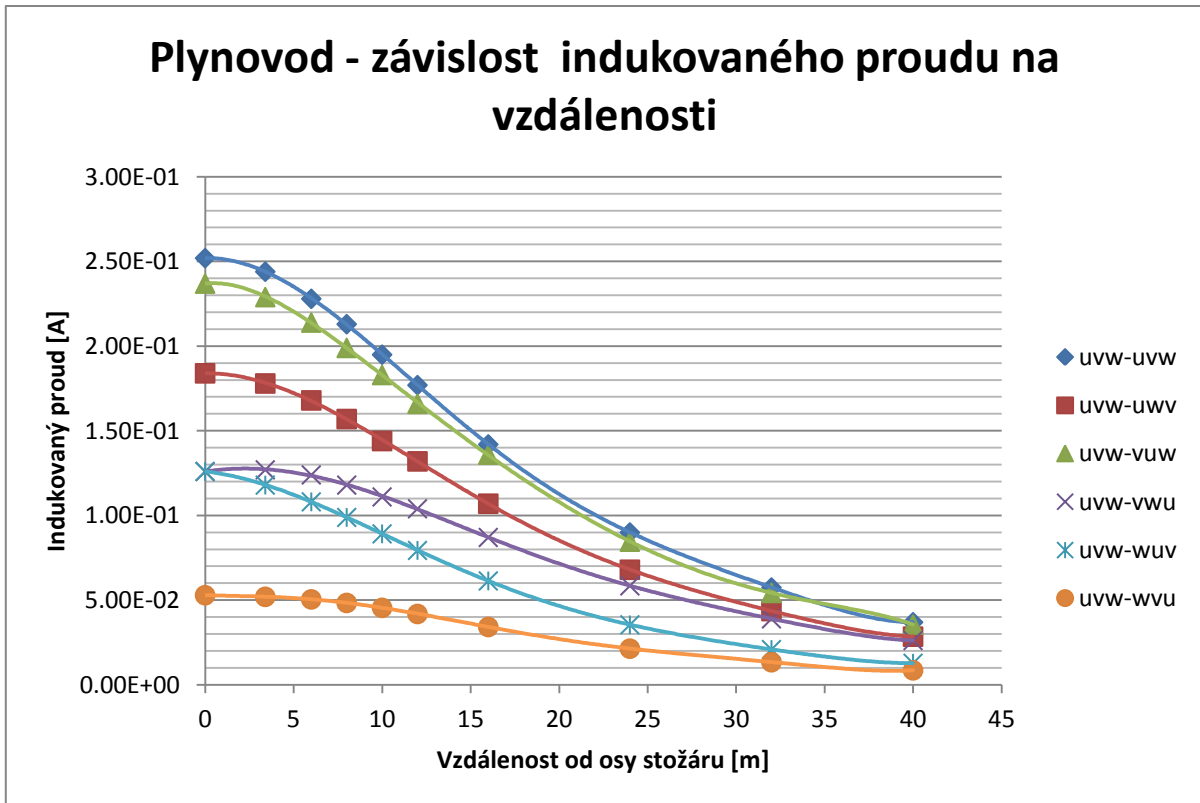
Kvůli velkému množství hodnot a grafů uvádím v samotné práci jen grafy pro potrubí plynovodní, které je uloženo mělčeji než potrubí vodovodní (viz kapitola 6). Z předchozího vyplývá, že magnetické pole venkovního vedení na plynovody, které jsou umístěny blíže k vodičům vvn než vodovody, působí více. Z tohoto důvodu volím uvedení právě potrubí plynovodního. Veškeré vypočtené hodnoty pro obě řešená potrubí jsou uvedeny v příloze. Dále uvádím v přílohách také grafy pro potrubí vodovodní.

Ve zkušebních výpočtech jsem se zabýval podobností výsledků řešených potrubí umístěných ve stejné hloubce. Výsledné hodnoty se lišily zanedbatelně. Z toho lze usoudit, že při řešení nežádoucích vlivů nezáleží na druhu přepravovaného média (voda nebo plyn). Dále jsem se zabýval vlivem půdy o rozdílných měrných elektrických vodivostech na výsledné hodnoty. Uvažoval jsem skálu o měrné elektrické vodivosti 0,0005 S/m a půdu o 0,1 S/m. Výsledky se lišily pouze minimálně.

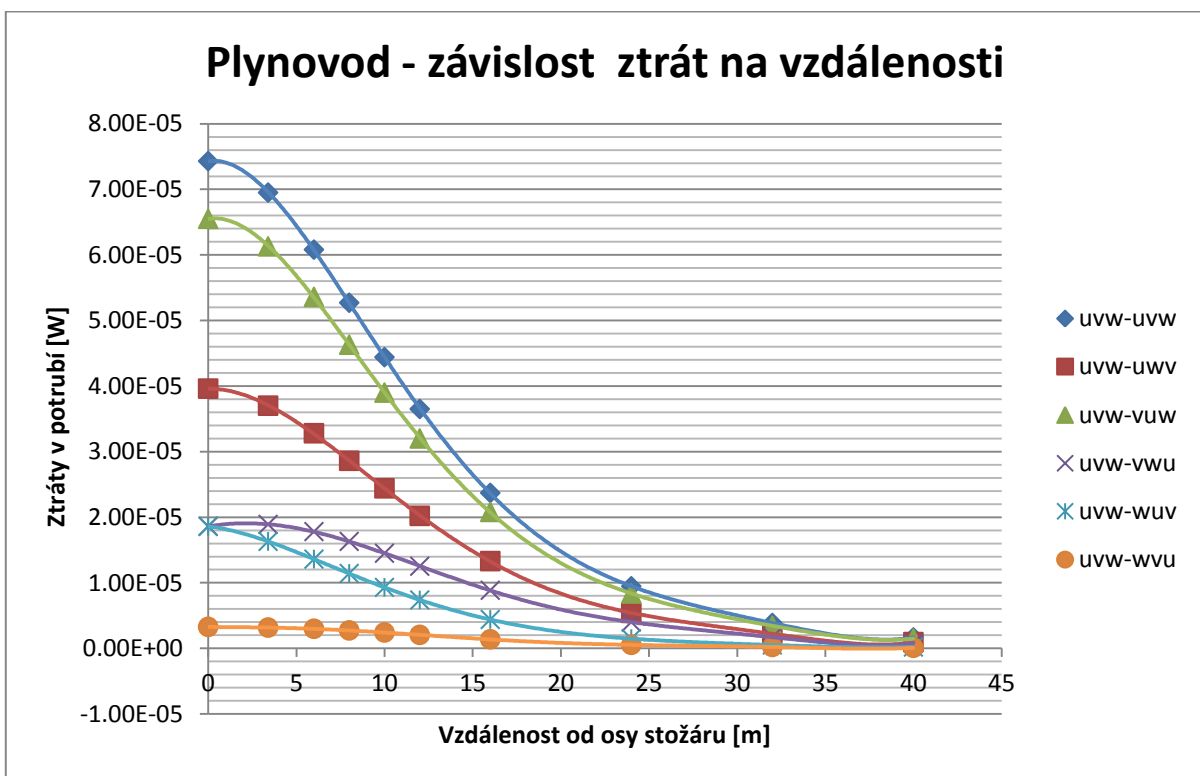
Následující grafy zobrazují velikosti indukovaných proudů do potrubí, ztráty způsobené těmito proudy, dále maximální proudové hustoty a magnetické indukce na povrchu uvažovaného potrubí pro 6 základních transpozic. To vše v závislosti na vzdálenosti od osy stožáru.



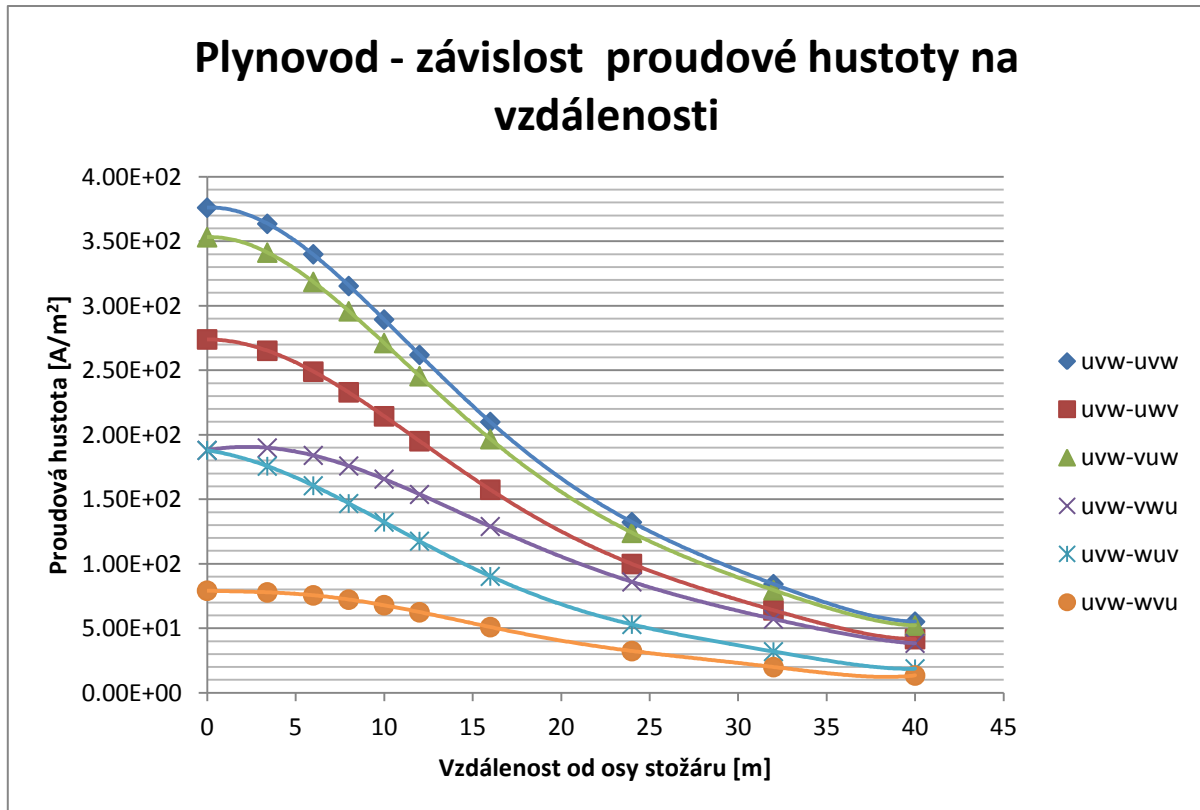
Obr. 20. Způsob zapojení fázových vodičů UVW – UVW.



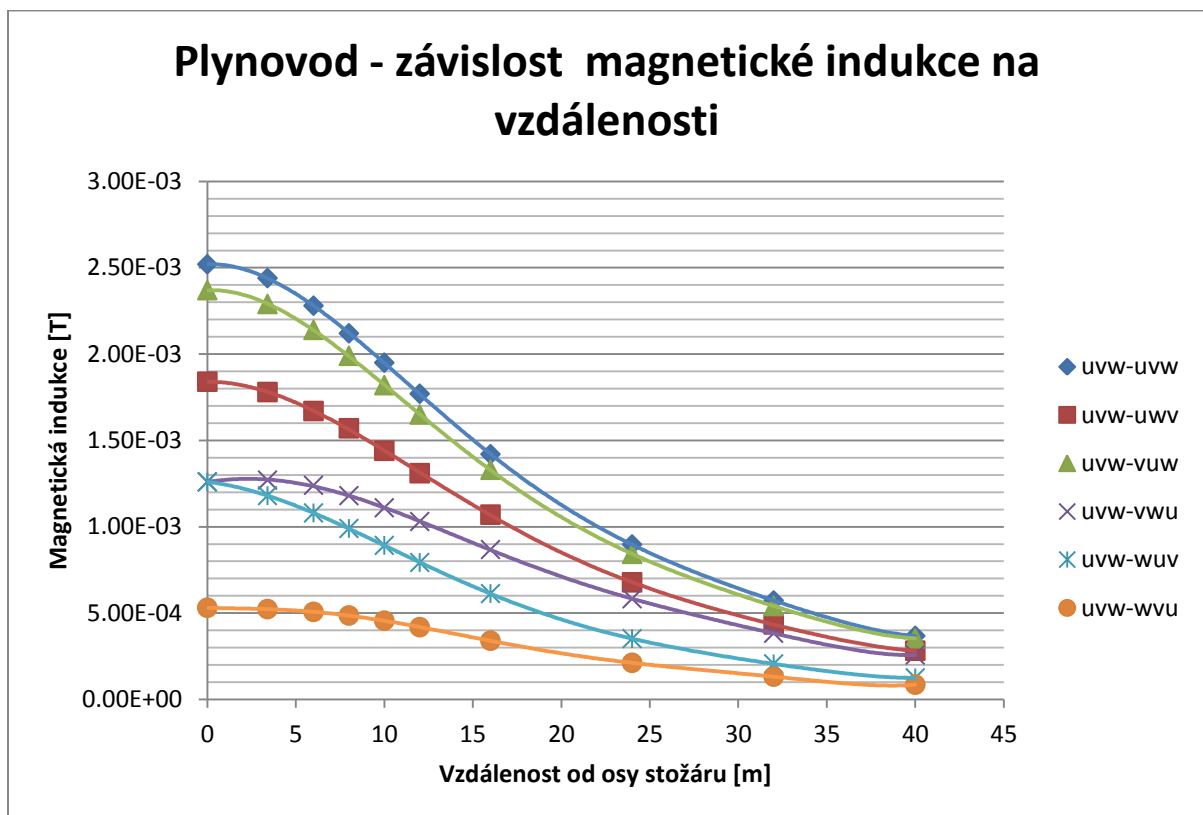
Obr. 21. Závislost indukovaného proudu do potrubí na vzdálenosti od osy stožáru.



Obr. 22. Závislost ztrát v potrubí na vzdálenosti od osy stožáru.



Obr. 23. Závislost proudové hustoty na povrchu potrubí na vzdálenosti od osy stožáru.



Obr. 24. Závislost maximální magnetické indukce na povrchu potrubí na vzdálenosti od osy stožáru.



## Zhodnocení

Z předložených grafů je zřejmé, že se hodnoty indukovaných proudů a proudových hustot vzniklých v potrubí, které se nacházejí v blízkosti vvn, v důsledku magnetického pole vytvořeného venkovním vedením pohybují v nebezpečných mezích (hodnoty proudové hustoty překračují hodnotu  $100 \text{ A/m}^2$ , viz kapitola 3.4, hodnota ustáleného mezního proudu dle ČSN 33 2000-4-41 je stanovena na 3,5 mA). Proto se v následujících odstavcích hodlám zabývat možností eliminace těchto vzniklých nežádoucích vlivů.

Dále lze také pozorovat, že varianta UVW – UVW měla ze všech provedených transpozic nejvyšší hodnoty, čili vycházela nejhůře, naopak nejnižší hodnoty měla varianta UVW – WVU.

## 7.4 Možnosti eliminace

Zkoumal jsem 5 různých způsobů eliminace pro variantu z mnou řešených transpozic s nejhorsími výsledky, ne všechny způsoby však byly efektivní. V prvním jsem volil ocel pro potrubí o menší relativní permeabilitě – snížil jsem ji z 8000 na 5000.

UVW - UVW					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [ $\text{A/m}^2$ ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	3.12E-01	368.6	8.39E-05	2.13E-03	3.39E-01
3.4	3.02E-01	356.5	7.86E-05	2.07E-03	3.29E-01
6	2.83E-01	332.9	6.88E-05	1.93E-03	3.07E-01
8	2.63E-01	309.3	5.96E-05	1.80E-03	2.86E-01
10	2.41E-01	283.4	5.01E-05	1.65E-03	2.63E-01
12	2.19E-01	256.4	4.12E-05	1.49E-03	2.37E-01
16	1.76E-01	205.7	2.68E-05	1.20E-03	1.91E-01
24	1.11E-01	131	1.07E-05	7.59E-04	1.21E-01
32	7.12E-02	83.6	4.36E-06	4.85E-04	7.72E-02
40	4.65E-02	54.6	1.86E-06	3.30E-04	5.25E-02

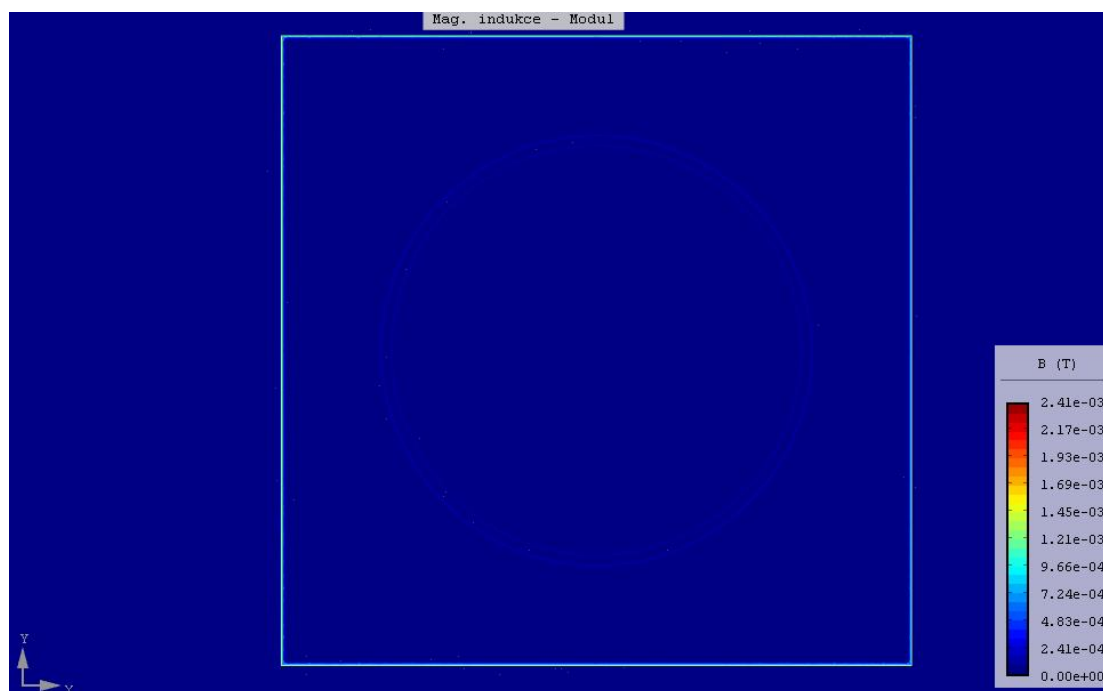
Tabulka 7. Eliminace snížením relativní permeability oceli pro potrubí.

Srovnáním s hodnotami před snížením relativní permeability lze pozorovat navýšení indukovaného proudu v řádech desítek mA a pokles proudové hustoty v řádech jednotek  $\text{A/m}^2$ . Realizace tedy nemá téměř žádný smysl. Tento způsob eliminace měl nejhorsí výsledky ze všech provedených.

Dále jsem volil způsob odstínění magnetického pole venkovního vedení principem Faradayovy klece (viz obr. 25). Materiál „klece“ jsem volil stejný jako materiál potrubí. Tloušťka stěny je 3 mm.

Potrubí uvažuji uložené v „kleci“ zasypané pískem, neboť kdyby bylo pouze na podpěrách ve vzduchu, hrozilo by tlaky okolní půdy na stěny „klece“ zborcení celého eliminačního zařízení.

Vypočtené hodnoty pro tento způsob obsahuje tabulka 8.



Obr. 25. Stínění potrubí založené na principu Faradayovy klece.

UVW - UVW						Stínící zařízení – F. klec			
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	2.14E-02	31.3	5.34E-07	2.10E-04	2.09E-02	4.64E-01	371	2.41E-03	2.40E-01
3.4	2.07E-02	30.3	5.00E-07	2.03E-04	2.02E-02	4.50E-01	359	2.34E-03	2.33E-01
6	1.94E-02	28.3	4.38E-07	1.90E-04	1.89E-02	4.20E-01	335	2.20E-03	2.19E-01
8	1.80E-02	26.3	3.79E-07	1.76E-04	1.75E-02	3.90E-01	312.8	2.04E-03	2.03E-01
10	1.65E-02	24.1	3.19E-07	1.60E-04	1.59E-02	3.58E-01	288	1.87E-03	1.86E-01
12	1.50E-02	21.9	2.62E-07	1.47E-04	1.46E-02	3.25E-01	260.3	1.70E-03	1.69E-01
16	1.20E-02	17.6	1.70E-07	1.18E-04	1.17E-02	2.60E-01	209	1.37E-03	1.36E-01
24	7.60E-03	11.1	6.78E-08	7.45E-05	7.41E-03	1.65E-01	134	8.59E-04	8.54E-02
32	4.86E-03	7.1	2.77E-08	4.77E-05	4.74E-03	1.06E-01	85.1	5.47E-04	5.44E-02
40	3.17E-03	4.6	1.18E-08	3.10E-05	3.08E-03	6.90E-02	55.2	3.40E-04	3.38E-02

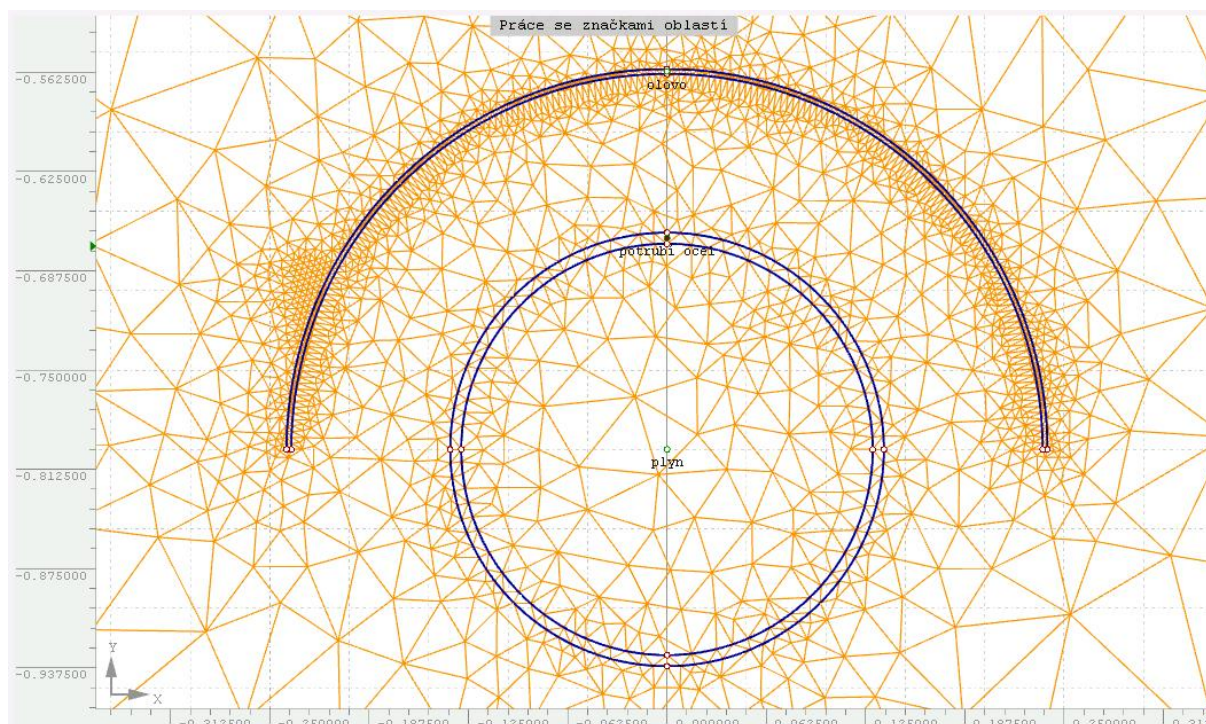
Tabulka 8. Eliminace založená na principu Faradayovy klece.

Takto provedený způsob je z hlediska snížení indukovaných proudů v potrubí a maximálních proudových hustot na povrchu potrubí nejefektivnější z mnoha řešených pěti možností. Nastává zde ale problém s indukovanými proudy ve stínícím zařízení. Předpokladem pro toto řešení je tedy kvalitní uzemnění „klece“. Z hlediska náročnosti výstavby a velkého množství potřebného materiálu je způsob založený na principu Faradayovy klece také nevhodný.

Třetí až pátou variantou je stínění plechem ve tvaru pláště půlválce. Důvodem je úspora materiálu. Materiály uvažují nejprve ocel pro potrubí, poté měď a nakonec olovo.

Realizaci míním tak, že potrubí uložené v zemi je zasypano okolní půdou a zhruba 10 cm nad ním je umístěn plech z daného materiálu o tloušťce 3 mm (viz obr. 26).

Vypočítané hodnoty jsou následně uvedeny v tabulkách. Nakonec přikládám grafy pro srovnání jednotlivých mnou řešených způsobů eliminace z hlediska indukovaného proudu do potrubí a maximální proudové hustoty na povrchu potrubí.



Obr. 26. Stínění potrubí plechem. Příklad diskretizace výpočetní oblasti v programu Agros2D.

Vzdálenost od osy stožáru [m]	UVW - UVW					Stínící zařízení - ocel pro potrubí			
	$I$ [A]	$J$ [ $A/m^2$ ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]	$I$ [A]	$J$ [ $A/m^2$ ]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	2.04E-01	276	4.88E-05	1.85E-03	1.84E-01	4.19E-01	317	3.36E-03	3.34E-01
3.4	1.98E-01	268.4	4.58E-05	1.79E-03	1.78E-01	4.06E-01	310	3.01E-03	2.99E-01
6	1.85E-01	252	4.02E-05	1.69E-03	1.68E-01	3.79E-01	288	2.82E-03	2.81E-01
8	1.72E-01	234.4	3.49E-05	1.57E-03	1.56E-01	3.53E-01	271	2.61E-03	2.60E-01
10	1.58E-01	214.7	2.94E-05	1.44E-03	1.43E-01	3.23E-01	251.7	2.39E-03	2.38E-01
12	1.44E-01	195.3	2.43E-05	1.31E-03	1.30E-01	2.93E-01	232	2.17E-03	2.16E-01
16	1.16E-01	158	1.58E-05	1.06E-03	1.05E-01	2.36E-01	187	1.74E-03	1.73E-01
24	7.35E-02	99.8	6.35E-06	6.68E-04	6.64E-02	1.48E-01	117	1.09E-03	1.08E-01
32	4.70E-02	63.8	2.60E-06	4.26E-04	4.24E-02	9.47E-02	77.7	6.90E-04	6.86E-02
40	3.07E-02	47.1	1.10E-06	2.79E-04	2.78E-02	6.20E-02	51.2	4.54E-04	4.52E-02

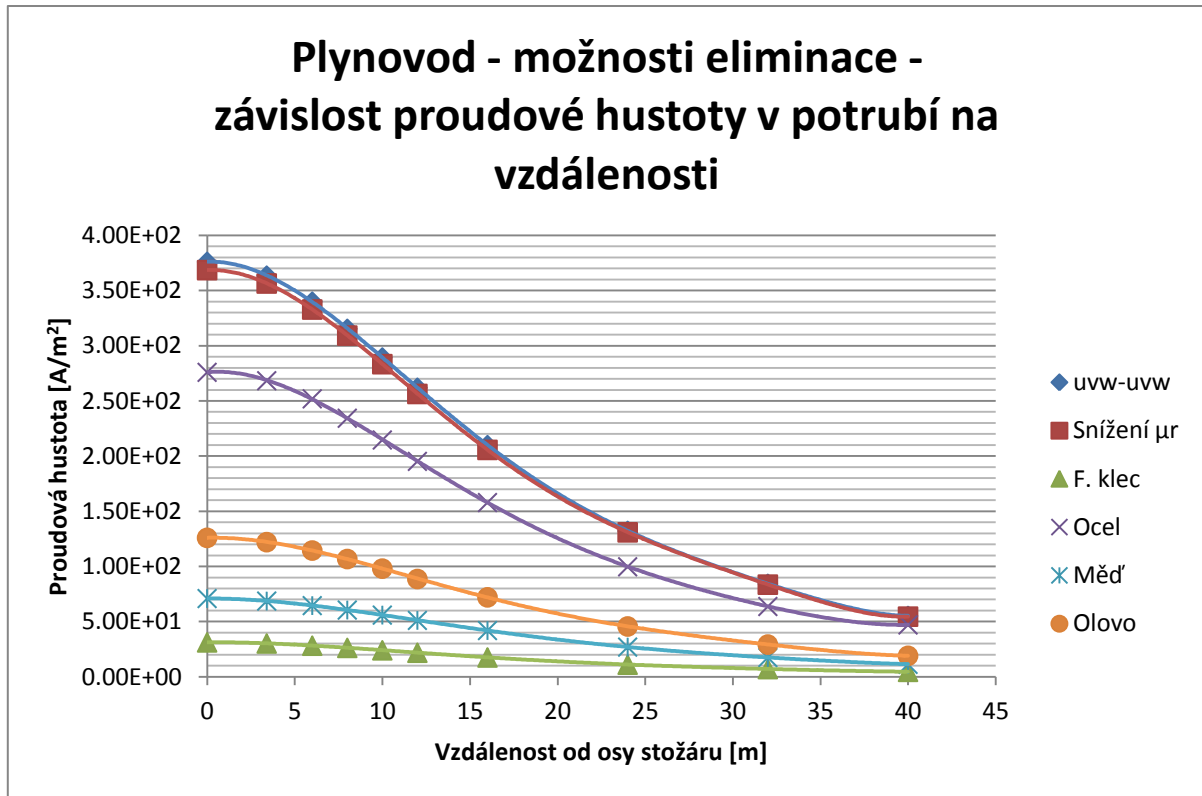
Tabulka 9. Eliminace stíněním plechem ve tvaru pláště půlválce z oceli pro potrubí.

Vzdálenost od osy stožáru [m]	UVW - UVW					Stínící zařízení - měď			
	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	2.22E-02	71	9.60E-07	4.78E-04	4.75E-02	2.37E+00	2899	7.49E-06	5.96E+00
3.4	2.15E-02	68.7	8.96E-07	4.60E-04	4.58E-02	2.29E+00	2855	7.29E-06	5.80E+00
6	2.02E-02	64.6	7.98E-07	4.33E-04	4.31E-02	2.14E+00	2729	7.00E-06	5.57E+00
8	1.89E-02	60.6	7.01E-07	4.07E-04	4.05E-02	1.98E+00	2571	6.66E-06	5.30E+00
10	1.75E-02	56	5.99E-07	3.76E-04	3.74E-02	1.81E+00	2389	6.10E-06	4.85E+00
12	1.60E-02	51.2	5.01E-07	3.43E-04	3.41E-02	1.63E+00	2190	5.62E-06	4.47E+00
16	1.31E-02	42	3.35E-07	2.81E-04	2.80E-02	1.31E+00	1792	4.60E-06	3.66E+00
24	8.39E-03	27	1.38E-07	1.82E-04	1.81E-02	8.14E-01	1140	2.92E-06	2.32E+00
32	5.39E-03	17.5	5.72E-08	1.17E-04	1.16E-02	5.17E-01	727	1.87E-06	1.49E+00
40	3.52E-03	11.4	2.45E-08	7.64E-05	7.60E-03	3.37E-01	474	1.22E-06	9.71E-01

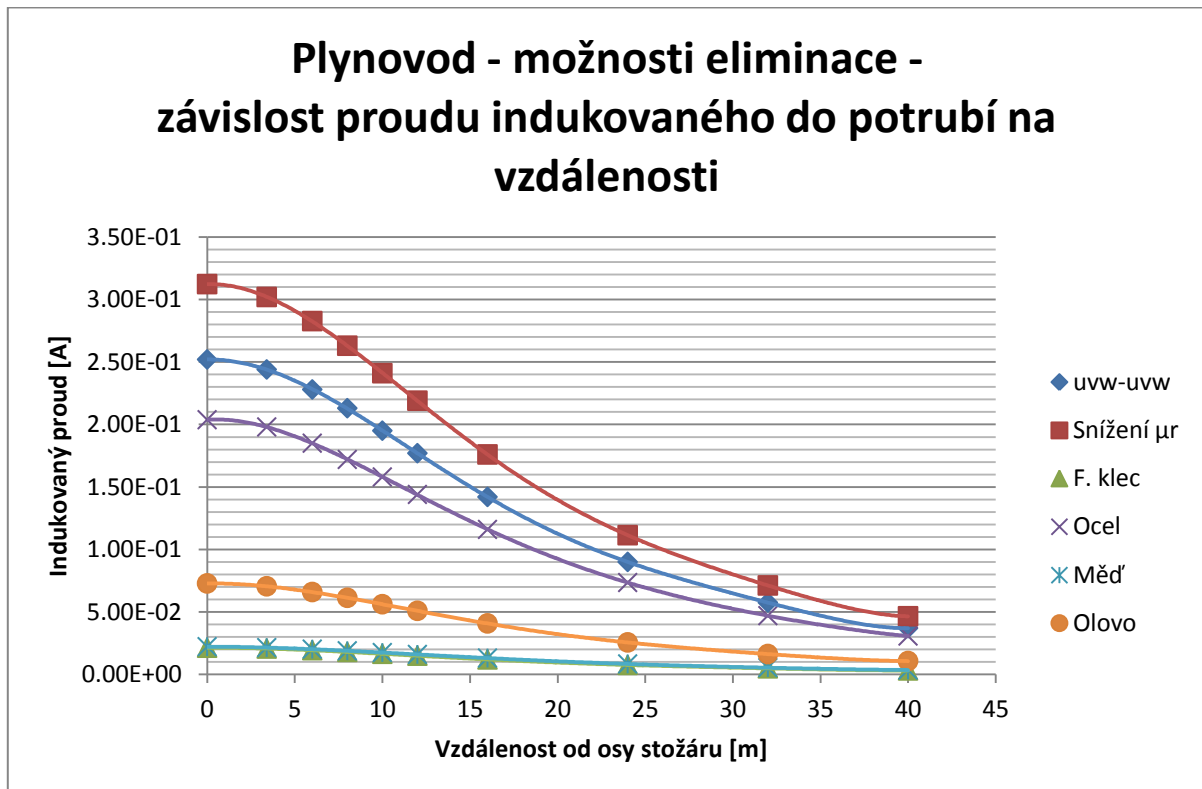
Tabulka 10. Eliminace stíněním plechem ve tvaru pláště půlválce z mědi.

Vzdálenost od osy stožáru [m]	UVW - UVW					Stínící zařízení - olovo			
	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	7.28E-02	126	6.73E-06	8.43E-04	8.39E-02	2.21E+00	1068	4.20E-06	3.34E+00
3.4	7.05E-02	122.1	6.30E-06	8.18E-04	8.14E-02	2.14E+00	1052	4.10E-06	3.26E+00
6	6.59E-02	114.5	5.52E-06	7.66E-04	7.62E-02	1.99E+00	995	3.84E-06	3.06E+00
8	6.13E-02	106.8	4.78E-06	7.15E-04	7.11E-02	1.85E+00	931.7	3.63E-06	2.89E+00
10	5.62E-02	98.1	4.02E-06	6.58E-04	6.55E-02	1.69E+00	857.8	3.31E-06	2.63E+00
12	5.09E-02	88.7	3.30E-06	5.99E-04	5.96E-02	1.52E+00	780.4	3.02E-06	2.40E+00
16	4.08E-02	72.1	2.14E-06	4.86E-04	4.83E-02	1.22E+00	629.5	2.45E-06	1.95E+00
24	2.56E-02	45.7	8.48E-07	3.07E-04	3.05E-02	7.58E-01	395.7	1.55E-06	1.23E+00
32	1.63E-02	29.3	3.45E-07	1.96E-04	1.95E-02	4.82E-01	251.4	9.90E-07	7.88E-01
40	1.07E-02	19.1	1.47E-07	1.28E-04	1.27E-02	3.15E-01	163.9	6.46E-07	5.14E-01

Tabulka 11. Eliminace stíněním plechem ve tvaru pláště půlválce z olova.



Obr. 27. Závislost  $J$  na povrchu potrubí při jednotlivých možnostech eliminace na vzdálenosti.



Obr. 28. Závislost proudu indukovaného do potrubí při jednotlivých možnostech eliminace na vzdálenosti.

## Zhodnocení

Z předchozích tabulek a grafů je zřejmé, že nejlépe dopadl způsob eliminace založen na principu Faradayovy klece, nejhůře pak eliminace snížením  $\mu_r$  oceli pro potrubí. Jako relativně dobré způsoby nekladoucí vysoké ekonomické nároky se jeví použití plechu ve tvaru pláště půlválce z mědi a olova. Z hlediska váhy je na tom olověný plech o něco hůře (jeden metr takto tvarovaného olověného plechu váží 25,4 kg, měděného pouze 20 kg). Dle [17] je k 4. 6. 2012 cena olova 1,88 \$ za 1 kg a cena mědi 7,36 \$ za 1 kg. Z toho lze vypočítat, že cena takto tvarovaného měděného plechu by byla zhruba třikrát vyšší než cena stejně tvarovaného plechu olověného (neuvažují-li přírážky za opracování).

V praxi by však nemusel být použit celý půloblouk (byl použit jen pro názornost), neboť se již dopředu ví, kde přesně bude potrubí umístěno. Pro stínění se tedy pak dá použít jen užší pásek natočený směrem k vedení.

Provedené eliminační metody však stále úplně nevyklučují riziko úrazu elektrickým proudem a nezaručují snížení proudových hustot na minimum. Provádí se pro snížení zmiňovaných vysokých hodnot indukovaných proudů a proudových hustot na rozumné hodnoty, což poté vede k menším nárokům na kvalitu izolace a na kvalitu uzemnění, z čehož plynou i menší ekonomické nároky.

Z důvodu velkých proudů indukovaných do stínícího zařízení předpokládám pro mnou řešené způsoby eliminace jejich kvalitní uzemnění. Z ekonomických důvodů je dalším předpokladem pro použití instalace výhradně jen v místech souběhu s venkovním vedením vvn.

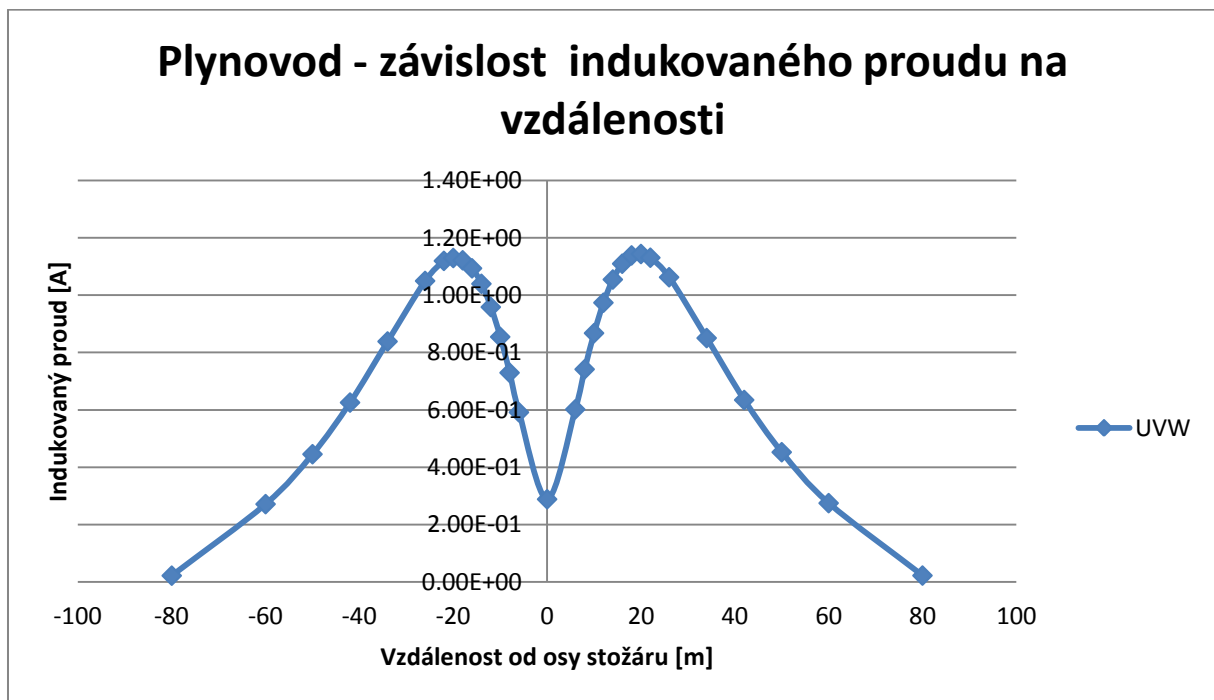
Nejjednodušším způsobem snížení nepříznivých vlivů na potrubní systémy však nadále zůstává dostatečná vzdálenost od vvn. Mnohdy se však při projektování tras potrubí souběhu s venkovním vedením vvn nelze vyhnout, pak je třeba volit nějaký z eliminačních způsobů. Například jeden z mnou řešených.

## 7.5 Numerický výpočet pro stožár typu „kočka“

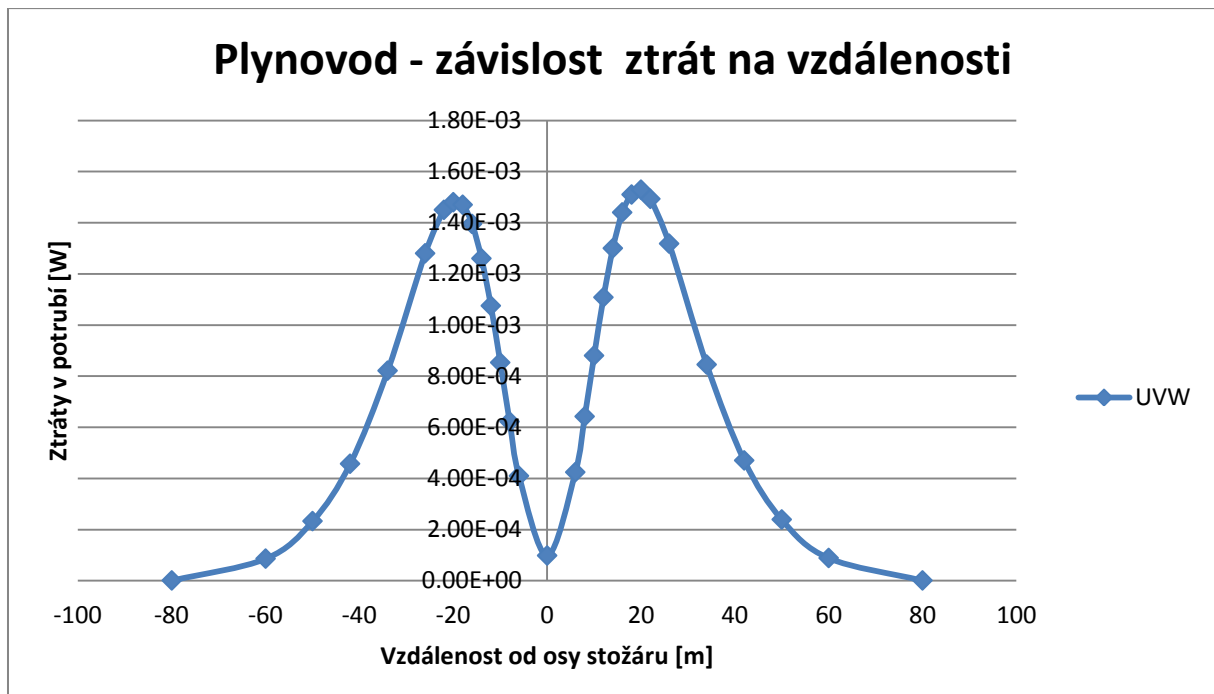
U stožáru „kočka“ existuje 6 možných transpozic. Po zkušebních výpočtech, kdy jsem testoval podobnost výsledků třech různých zapojení, jsem ověřil, že hodnoty pro tato zapojení vycházejí naprosto stejně. Tudíž se hodlám věnovat pouze jednomu z nich, a to například UVW. Jelikož simuluji pouze pro jednu transpozici, hodlám ověřit symetrii výsledků pravé a levé strany od osy stožáru. V samotné práci uvádím opět jen grafy pro potrubí plynovodní. Veškeré vypočtené hodnoty pro obě řešená potrubí jsou uvedeny v příloze. Dále uvádím v přílohách také grafy pro potrubí vodovodní.

Výpočty probíhaly za stejného nastavení programu jako u stožáru „soudek“ (viz kapitola 7.3).

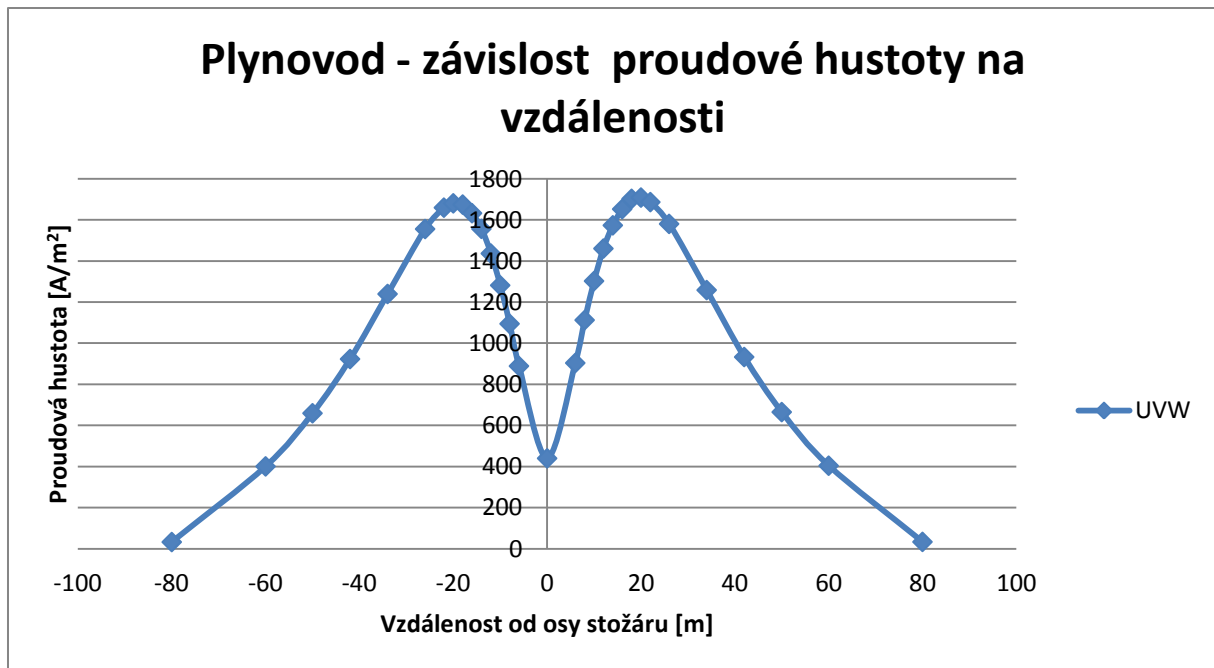
Následující grafy zobrazují velikosti indukovaných proudů do potrubí, ztráty způsobené těmito proudy, dále maximální proudové hustoty a magnetické indukce na povrchu uvažovaného potrubí. To vše v závislosti na vzdálenosti od osy stožáru.



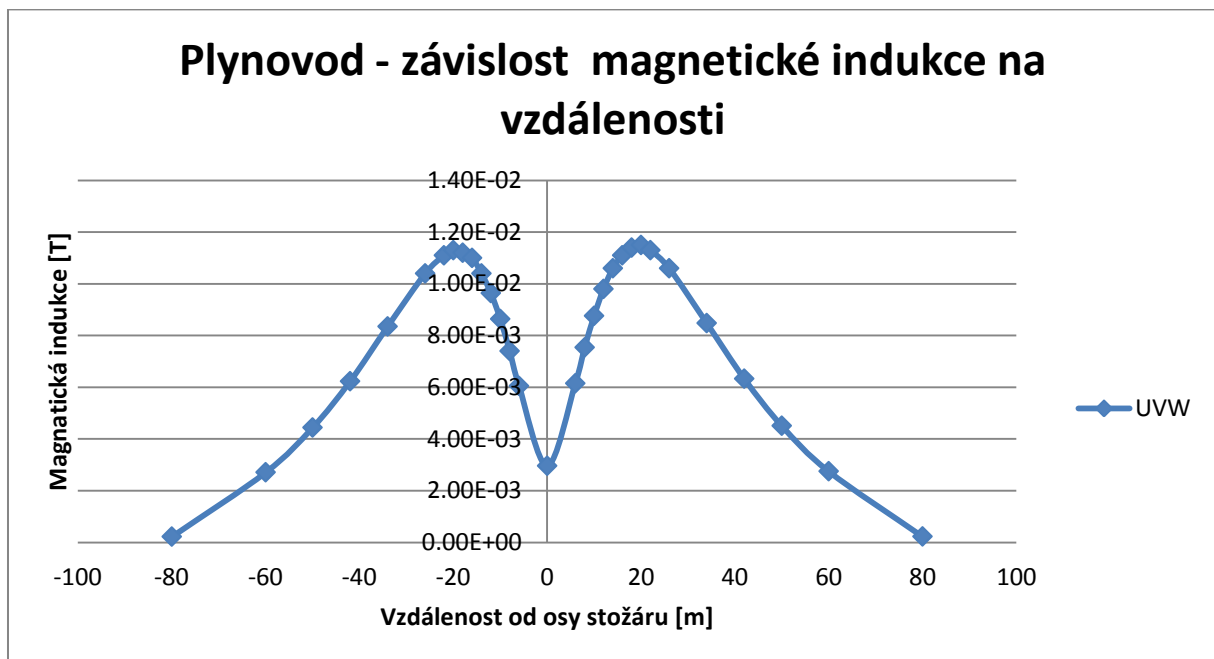
Obr. 29. Závislost indukovaného proudu do potrubí na vzdálenosti od osy stožáru.



Obr. 30. Závislost ztrát v potrubí na vzdálenosti od osy stožáru.



Obr. 31. Závislost maximální proudové hustoty na povrchu potrubí na vzdálenosti od osy stožáru.



Obr. 32. Závislost maximální magnetické indukce na povrchu potrubí na vzdálenosti od osy stožáru.

## Zhodnocení

Grafy ukazují, že hodnoty indukovaných proudů a maximálních proudových hustot jsou daleko za hranicí bezpečných mezí. U tohoto typu stožáru s vedením 1x400 kV je z důvodu zmiňovaných vysokých hodnot (vyšších než  $100 \text{ A/m}^2$ ) nejúčinnější a nejekonomičtější ochrana dostatečnou vzdáleností potrubí od nejkrajnějšího vodiče stožáru. Pokud však při projektování trasy potrubí nebo samotného vedení nelze jinak řešit, například z důvodu členitosti terénu, je nutné použít jednu z eliminačních metod, potrubí v daném souběhu s vedením důkladně uzemnit a použít na něj velice kvalitní izolaci.



## **Závěr**

V této práci jsem se zabýval elektromagnetickými poli vznikajícími v okolí venkovních nadzemních vedení. Zejména jsem věnoval pozornost vedení velmi vysokých napětí, neboť u hladin nižších napětí vzniklá elektromagnetická pole nejsou tak silná a jejich působení na své okolí není pak příliš markantní.

Mým úkolem bylo zjistit vliv venkovních přenosových soustav na blízká úložná zařízení pomocí výpočetního programu. Pro řešení jsem využil programu vyvíjeného samotnou Západočeskou univerzitou, jenž nese název Agros2D. K hlavním výhodám této aplikace patří volná licence, a tudíž její volné používání například v klidu v domácnosti, uživatelské prostředí v českém jazyce a jednoduchost ovládání.

Pro názornou ukázkou ovlivňování podzemních úložných zařízení přenosovými soustavami jsem zvolil řešení pro dva různé typy stožáru vvn a dvě různá úložná zařízení, jmenovitě pak stožár typu „soudek“, stožár typu „kočka“ a z úložných zařízení potrubí vodovodní a plynovodní.

Výsledné hodnoty, které jsem nechal vypočítat programem Agros2D, nabývaly ve většině případů velmi vysokých rozměrů. Z toho důvodu je tedy nutné situaci při souběhu podzemního potrubí s venkovním vedením vždy nejprve numericky nebo analyticky vyšetřit a poté podle výsledných hodnot vhodným způsobem řešit tak, aby nedošlo například k velkým národohospodářským ztrátám způsobeným proděravěním potrubí vlivem koroze vyvolané proudy indukovanými do téhož potrubí v důsledku elektromagnetického pole venkovních přenosových soustav, nebo k úrazu pracovníků pohybujících se v blízkosti potrubních systémů souběžných s vvn již zmiňovaným indukovaným elektrickým proudem.

V závěru mé práce jsem zkoumal různé možnosti potlačení vlivu venkovních vedení. K dispozici je zde 5 různých variant včetně jejich numerického řešení a ekonomického zhodnocení.

## Použitá literatura

- [1] MAYER, D. *Pohledy do minulosti elektrotechniky*. Nakladatelství KOPP. České Budějovice 2004.
- [2] MAYER, D. *Teorie elektromagnetického pole*. Západočeská univerzita v Plzni. Plzeň 2004.
- [3] POLÁK, J. – VELETA, P. *Rukověť katodické protikorozní ochrany*. Český plynárenský svaz. Praha 2002.
- [4] ČSN 33 2165 – *Zásady pro ochranu ocelových izolovaných potrubí uložených v zemi před nebezpečnými vlivy venkovních trojfázových vedení a stanic vvn a zvn*.
- [5] *Výstavba přenosové soustavy ČEPS, a.s.*. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Media/Ke-stazeni/Stranky/Publikace-CEPS.aspx>. 8. 5. 2012.
- [6] PROCHÁZKA, R. *Stožáry VVN (I). Stožáry VVN (II). Stožáry VVN (III)*. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/autori/radek-prochazka>. 29. 5. 2012.
- [7] BÜCHLER, M. *Pipeline Corrosion due to AC interference*. Dostupné z: [http://people.ee.ethz.ch/~serec/files/9\\_BUECHLER%20serec.pdf](http://people.ee.ethz.ch/~serec/files/9_BUECHLER%20serec.pdf). 8. 5. 2012.
- [8] MÍČKO, F. *Katodická ochrana místních rozvodů*. Dostupné z: <http://www.ateko.info/download/2008/micko1.pdf>. 8. 5. 2012.
- [9] KOUDELKA, C. *Bludné proudy*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Ostrava 2003.
- [10] *Koroze kovových úložných zařízení a působení bludných proudů*. Dostupné z: <http://www.elektrika.cz>. 8. 5. 2012.
- [11] *Patinující ocel*. Dostupné z: [http://www.atmofix.cz/ocel\\_cz.php](http://www.atmofix.cz/ocel_cz.php). 8. 5. 2012.
- [12] ČSN 73 6005 – *Prostorové uspořádání sítí technického vybavení*.
- [13] ČSN 42 5715 - *Trubky ocelové bezešvé tvářené za tepla. Rozměry*.
- [14] MERTLOVÁ, J. – NOHÁČOVÁ L. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd.. Západočeská univerzita v Plzni. Plzeň 2008.
- [15] <http://www.agros2d.org>, 29. 5. 2012.
- [16] Doc. Ing. Bohuš Ulrych, CSc.: Přednášky a cvičení předmětu SPEP.
- [17] <http://www.lme.com/non-ferrous/index.asp>, 4. 6. 2012

## **Seznam příloh**

- A Tabulky obsahující hodnoty řešeného plynovodního potrubí v blízkosti stožáru typu „soudek“
- B Grafy a tabulky obsahující hodnoty řešeného vodovodního potrubí v blízkosti stožáru typu „soudek“
- C Tabulky obsahující hodnoty řešeného plynovodního potrubí v blízkosti stožáru typu „kočka“
- D Grafy a tabulky obsahující hodnoty řešeného vodovodního potrubí v blízkosti stožáru typu „kočka“

## A Tabulky obsahující hodnoty řešeného plynovodního potrubí v blízkosti stožáru typu „soudek“

Červeně jsou vyznačeny nejvyšší hodnoty indukovaných proudů z šesti různých transpozic v každé vzdálenosti. Z tabulky je zřejmé, že transpozice UVW – UVW vycházela ve všech vzdálenostech nejhůře, naopak nejlépe vycházela transpozice UVW – WVU.

UVW - UVW					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	2.52E-01	376.1	7.43E-05	2.52E-03	2.51E-01
3.4	2.44E-01	363.6	6.95E-05	2.44E-03	2.43E-01
6	2.28E-01	340	6.08E-05	2.28E-03	2.27E-01
8	2.13E-01	315.4	5.27E-05	2.12E-03	2.11E-01
10	1.95E-01	289.4	4.44E-05	1.95E-03	1.94E-01
12	1.77E-01	262	3.65E-05	1.77E-03	1.76E-01
16	1.42E-01	210	2.37E-05	1.42E-03	1.41E-01
24	9.00E-02	132.3	9.46E-06	8.97E-04	8.92E-02
32	5.75E-02	84.3	3.86E-06	5.73E-04	5.70E-02
40	3.70E-02	55.2	1.65E-06	3.68E-04	3.66E-02
UVW - UWV					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	1.84E-01	274	3.96E-05	1.84E-03	1.83E-01
3.4	1.78E-01	265.2	3.70E-05	1.78E-03	1.77E-01
6	1.68E-01	249	3.28E-05	1.67E-03	1.66E-01
8	1.57E-01	233	2.86E-05	1.57E-03	1.56E-01
10	1.44E-01	214.4	2.44E-05	1.44E-03	1.43E-01
12	1.32E-01	195.1	2.02E-05	1.31E-03	1.30E-01
16	1.07E-01	157.5	1.33E-05	1.07E-03	1.06E-01
24	6.80E-02	99.9	5.40E-06	6.78E-04	6.74E-02
32	4.36E-02	64	2.22E-06	4.34E-04	4.32E-02
40	2.85E-02	41.7	9.46E-07	2.82E-04	2.81E-02
UVW - VUW					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	2.37E-01	353.2	6.55E-05	2.37E-03	2.36E-01
3.4	2.29E-01	341.3	6.13E-05	2.29E-03	2.28E-01
6	2.14E-01	318.6	5.36E-05	2.14E-03	2.13E-01
8	1.99E-01	295.8	4.63E-05	1.99E-03	1.98E-01
10	1.83E-01	271.2	3.90E-05	1.82E-03	1.81E-01
12	1.66E-01	245.5	3.20E-05	1.65E-03	1.64E-01
16	1.36E-01	196.7	2.08E-05	1.33E-03	1.32E-01
24	8.46E-02	124.1	8.35E-06	8.43E-04	8.39E-02
32	5.43E-02	79.6	3.44E-06	5.41E-04	5.38E-02
40	3.56E-02	52.2	1.48E-06	3.54E-04	3.52E-02

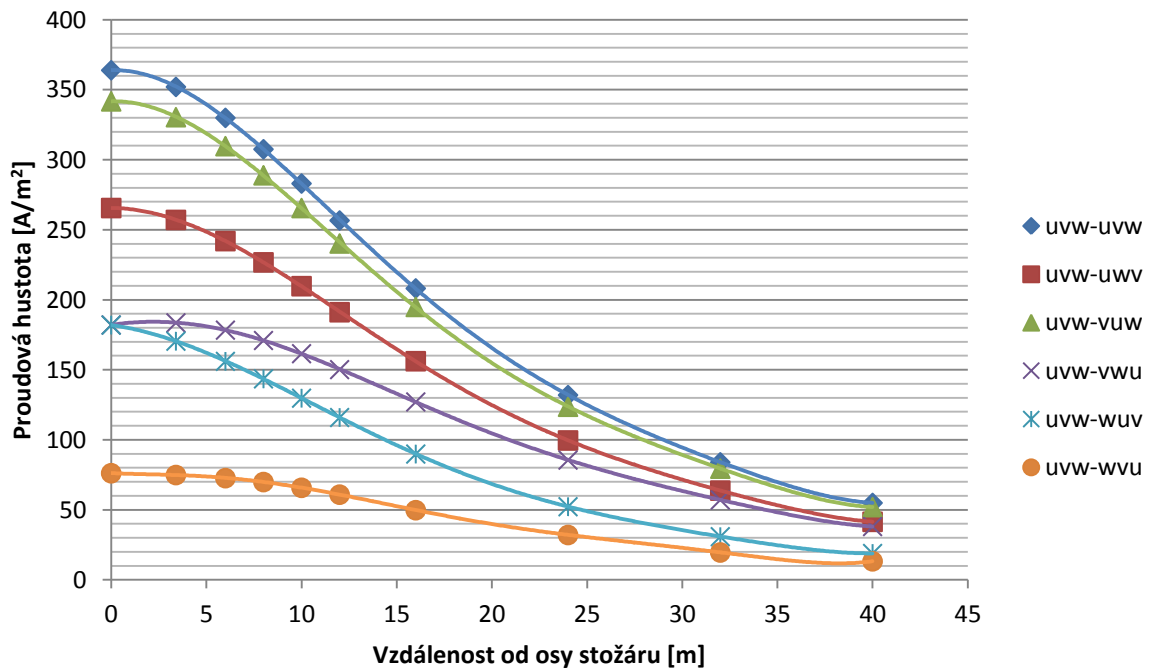
UVW - VWU					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	1.26E-01	188	1.86E-05	1.26E-03	1.25E-01
3.4	1.27E-01	189.9	1.89E-05	1.27E-03	1.26E-01
6	1.24E-01	184.1	1.78E-05	1.24E-03	1.23E-01
8	1.18E-01	175.9	1.63E-05	1.18E-03	1.17E-01
10	1.11E-01	165.7	1.45E-05	1.11E-03	1.10E-01
12	1.04E-01	153.8	1.25E-05	1.03E-03	1.02E-01
16	8.71E-02	129	8.85E-06	8.68E-04	8.63E-02
24	5.85E-02	86	4.00E-06	5.83E-04	5.80E-02
32	3.90E-02	57.2	1.70E-06	3.83E-04	3.81E-02
40	2.62E-02	38.4	8.00E-07	2.57E-04	2.56E-02
UVW - WUV					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	1.26E-01	188	1.86E-05	1.26E-03	1.25E-01
3.4	1.18E-01	175.7	1.63E-05	1.18E-03	1.17E-01
6	1.08E-01	160.6	1.36E-05	1.08E-03	1.07E-01
8	9.89E-02	146.8	1.14E-05	9.90E-04	9.85E-02
10	8.92E-02	132.3	9.29E-06	8.92E-04	8.87E-02
12	7.94E-02	117.6	7.37E-06	7.93E-04	7.89E-02
16	6.14E-02	90.3	4.40E-06	6.13E-04	6.10E-02
24	3.55E-02	53	1.47E-06	3.52E-04	3.50E-02
32	2.09E-02	32	5.11E-07	2.06E-04	2.05E-02
40	1.28E-02	18.7	1.92E-07	1.25E-04	1.24E-02
UVW - WVU					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	5.30E-02	79.2	3.27E-06	5.31E-04	5.28E-02
3.4	5.20E-02	77.9	3.16E-06	5.23E-04	5.20E-02
6	5.05E-02	75.6	2.98E-06	5.07E-04	5.04E-02
8	4.84E-02	72.3	2.73E-06	4.86E-04	4.83E-02
10	4.55E-02	68	2.41E-06	4.56E-04	4.54E-02
12	4.19E-02	62.5	2.05E-06	4.19E-04	4.16E-02
16	3.42E-02	51	1.37E-06	3.40E-04	3.38E-02
24	2.14E-02	32.4	5.32E-07	2.12E-04	2.11E-02
32	1.34E-02	20	2.08E-07	1.32E-04	1.31E-02
40	8.60E-03	13.5	8.63E-08	8.56E-05	8.51E-03

## B Grafy a tabulky obsahující hodnoty řešeného vodovodního potrubí v blízkosti stožáru typu „soudek“

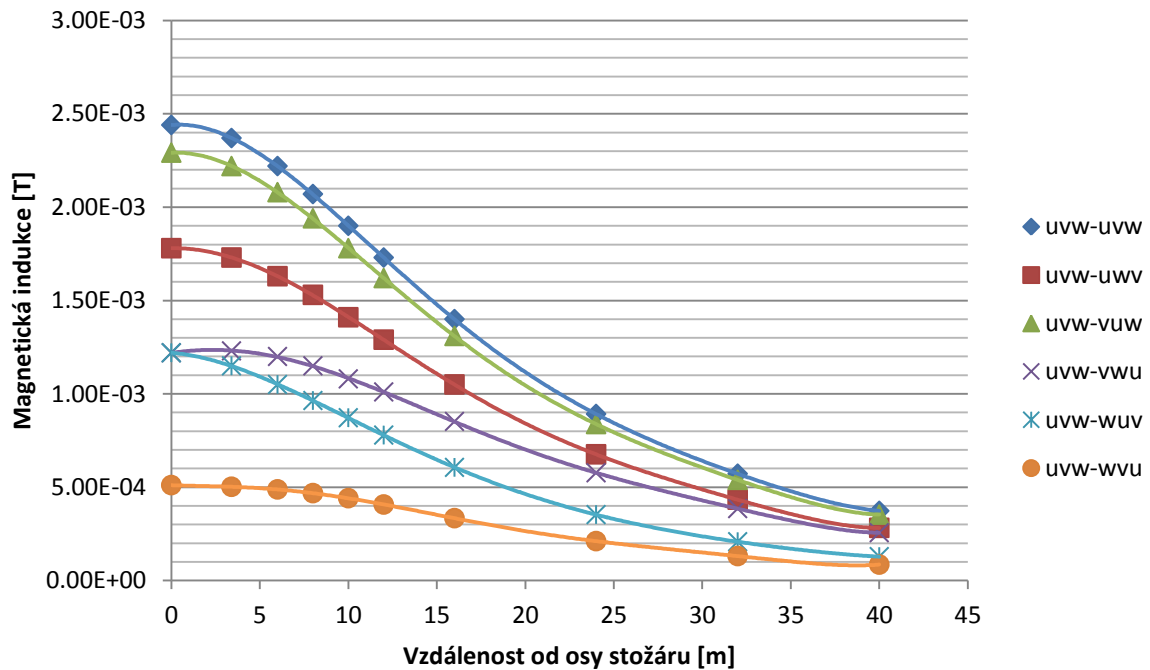
UVW - UVW					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	2.44E-01	364	6.96E-05	2.44E-03	2.43E-01
3.4	2.37E-01	352.1	6.53E-05	2.37E-03	2.36E-01
6	2.22E-01	330	5.75E-05	2.22E-03	2.21E-01
8	2.07E-01	307.6	5.00E-05	2.07E-03	2.06E-01
10	1.90E-01	283.1	4.24E-05	1.90E-03	1.89E-01
12	1.73E-01	256.7	3.51E-05	1.73E-03	1.72E-01
16	1.41E-01	208.2	2.30E-05	1.40E-03	1.39E-01
24	8.95E-02	132	9.34E-06	8.92E-04	8.87E-02
32	5.74E-02	84	3.82E-06	5.72E-04	5.69E-02
40	3.75E-02	55	1.64E-06	3.73E-04	3.71E-02
UVW - UWV					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	1.78E-01	265.6	3.71E-05	1.78E-03	1.77E-01
3.4	1.73E-01	257.1	3.49E-05	1.73E-03	1.72E-01
6	1.63E-01	242	3.10E-05	1.63E-03	1.62E-01
8	1.53E-01	226.8	2.72E-05	1.53E-03	1.52E-01
10	1.41E-01	209.8	2.33E-05	1.41E-03	1.40E-01
12	1.29E-01	191.2	1.95E-05	1.29E-03	1.28E-01
16	1.05E-01	156.2	1.30E-05	1.05E-03	1.04E-01
24	6.76E-02	99.6	5.34E-06	6.76E-04	6.72E-02
32	4.36E-02	63.8	2.20E-06	4.33E-04	4.31E-02
40	2.84E-02	41.5	9.42E-07	2.82E-04	2.81E-02
UVW - VUW					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	2.29E-01	341.8	6.13E-05	2.29E-03	2.28E-01
3.4	2.22E-01	330.5	5.75E-05	2.22E-03	2.21E-01
6	2.08E-01	309.8	5.05E-05	2.08E-03	2.07E-01
8	1.94E-01	289	4.40E-05	1.94E-03	1.93E-01
10	1.79E-01	265.6	3.73E-05	1.78E-03	1.77E-01
12	1.63E-01	240.3	3.08E-05	1.62E-03	1.61E-01
16	1.32E-01	195	2.03E-05	1.31E-03	1.30E-01
24	8.41E-02	123.7	8.25E-06	8.38E-04	8.34E-02
32	5.42E-02	79.5	3.42E-06	5.39E-04	5.36E-02
40	3.55E-02	52	1.48E-06	3.53E-04	3.51E-02

UVW - VWU					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	1.22E-01	182.1	1.74E-05	1.22E-03	1.21E-01
3.4	1.23E-01	183.6	1.78E-05	1.23E-03	1.12E-01
6	1.20E-01	178.4	1.68E-05	1.20E-03	1.19E-01
8	1.15E-01	171	1.54E-05	1.15E-03	1.14E-01
10	1.09E-01	161.6	1.38E-05	1.08E-03	1.07E-01
12	1.01E-01	150.2	1.20E-05	1.01E-03	1.00E-01
16	8.55E-02	127.1	8.53E-06	8.52E-04	8.48E-02
24	5.79E-02	85.6	3.93E-06	5.77E-04	5.74E-02
32	3.87E-02	57.1	1.75E-06	3.85E-04	3.83E-02
40	2.60E-02	38.1	7.92E-07	2.56E-04	2.55E-02
UVW - WUV					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	1.22E-01	182	1.74E-05	1.22E-03	1.21E-01
3.4	1.14E-01	170.5	1.53E-05	1.15E-03	1.14E-01
6	1.05E-01	156.1	1.89E-05	1.05E-03	1.04E-01
8	9.64E-02	143.6	1.09E-05	9.64E-04	9.59E-02
10	8.72E-02	129.8	8.89E-06	8.72E-04	8.67E-02
12	7.80E-02	116	7.10E-06	7.79E-04	7.75E-02
16	6.07E-02	89.9	4.30E-06	6.06E-04	6.03E-02
24	3.54E-02	52.3	1.47E-06	3.53E-04	3.51E-02
32	2.10E-02	30.9	5.14E-07	2.08E-04	2.07E-02
40	1.29E-02	18.9	1.93E-07	1.28E-04	1.27E-02
UVW - WVU					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
0	5.10E-02	76.2	3.04E-06	5.11E-04	5.08E-02
3.4	5.01E-02	74.9	2.93E-06	5.02E-04	4.99E-02
6	4.86E-02	72.7	2.76E-06	4.88E-04	4.85E-02
8	4.67E-02	69.9	2.54E-06	4.68E-04	4.66E-02
10	4.40E-02	65.8	2.26E-06	4.41E-04	4.39E-02
12	4.07E-02	60.9	1.93E-06	4.07E-04	4.05E-02
16	3.35E-02	49.8	1.31E-06	3.34E-04	3.32E-02
24	2.12E-02	32.1	5.22E-07	2.11E-04	2.10E-02
32	1.33E-02	19.6	2.07E-07	1.31E-04	1.30E-02
40	8.58E-03	13.3	8.59E-08	8.54E-05	8.49E-03

### Vodovod- závislost proudové hustoty na vzdálenosti



### Vodovod - závislost magnetické indukce na vzdálenosti





## C Tabulky obsahující hodnoty řešeného plynovodního potrubí v blízkosti stožáru typu „kočka“

UVW					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
-80	2.26E-02	33.2	5.99E-07	2.22E-04	2.21E-02
-60	2.72E-01	401.2	8.60E-05	2.71E-03	2.70E-01
-50	4.46E-01	659.7	2.33E-04	4.44E-03	4.42E-01
-42	6.26E-01	923.5	4.57E-04	6.23E-03	6.20E-01
-34	8.39E-01	1240	8.21E-04	8.35E-03	8.31E-01
-26	1.05E+00	1556	1.28E-03	1.04E-02	1.03E+00
-22	1.12E+00	1660	1.45E-03	1.11E-02	1.10E+00
-20	1.13E+00	1681	1.48E-03	1.13E-02	1.12E+00
-18	1.12E+00	1675	1.47E-03	1.12E-02	1.11E+00
-16	1.09E+00	1633	1.40E-03	1.10E-02	1.09E+00
-14	1.04E+00	1557	1.26E-03	1.04E-02	1.03E+00
-12	9.59E-01	1437	1.08E-03	9.64E-03	9.59E-01
-10	8.55E-01	1282	8.53E-04	8.64E-03	8.59E-01
-8	7.30E-01	1095	6.22E-04	7.40E-03	7.36E-01
-6	5.92E-01	889.3	4.10E-04	6.05E-03	6.02E-01
0	2.89E-01	440.4	9.80E-05	2.96E-03	2.94E-01
6	6.02E-01	904.2	4.24E-04	6.15E-03	6.12E-01
8	7.42E-01	1113	6.42E-04	7.54E-03	7.50E-01
10	8.68E-01	1303	8.80E-04	8.76E-03	8.71E-01
12	9.74E-01	1461	1.11E-03	9.80E-03	9.75E-01
14	1.06E+00	1574	1.30E-03	1.06E-02	1.05E+00
16	1.11E+00	1653	1.44E-03	1.11E-02	1.10E+00
18	1.14E+00	1703	1.51E-03	1.14E-02	1.13E+00
20	1.14E+00	1709	1.53E-03	1.15E-02	1.14E+00
22	1.13E+00	1687	1.49E-03	1.13E-02	1.12E+00
26	1.06E+00	1581	1.32E-03	1.06E-02	1.05E+00
34	8.51E-01	1259	8.45E-04	8.48E-03	8.44E-01
42	6.35E-01	933.3	4.70E-04	6.33E-03	6.30E-01
50	4.53E-01	665.4	2.39E-04	4.51E-03	4.49E-01
60	2.75E-01	404.6	8.85E-05	2.75E-03	2.74E-01
80	2.29E-02	33.9	6.17E-07	2.28E-04	2.27E-02

## D Grafy a tabulky obsahující hodnoty řešeného vodovodního potrubí v blízkosti stožáru typu „kočka“

UVW					
Vzdálenost od osy stožáru [m]	$I$ [A]	$J$ [A/m <sup>2</sup> ]	Ztráty v potrubí [W]	$B$ [T]	$H$ [A/m]
-80	2.24E-02	32.9	5.89E-07	2.19E-04	2.18E-02
-60	2.69E-01	396.1	8.42E-05	2.68E-03	2.67E-01
-50	4.41E-01	650.8	2.27E-04	4.93E-03	4.90E-01
-42	6.16E-01	909.7	4.32E-04	6.14E-03	6.11E-01
-34	8.22E-01	1218	7.89E-04	8.18E-03	8.14E-01
-26	1.02E+00	1515	1.21E-03	1.02E-02	1.01E+00
-22	1.08E+00	1604	1.36E-03	1.08E-02	1.07E+00
-20	1.09E+00	1626	1.39E-03	1.09E-02	1.08E+00
-18	1.08E+00	1616	1.37E-03	1.08E-02	1.07E+00
-16	1.05E+00	1574	1.29E-03	1.06E-02	1.05E+00
-14	1.00E+00	1493	1.17E-03	1.00E-02	9.95E-01
-12	9.21E-01	1377	9.91E-04	9.26E-03	9.21E-01
-10	8.20E-01	1229	7.85E-04	8.29E-03	8.25E-01
-8	6.99E-01	1048	5.70E-04	7.09E-03	7.05E-01
-6	5.66E-01	848	3.74E-04	5.77E-03	5.74E-01
0	2.69E-01	410.3	8.50E-05	2.75E-03	2.74E-01
6	5.76E-01	864	3.87E-04	5.89E-03	5.86E-01
8	7.10E-01	1066	5.89E-04	7.21E-03	7.17E-01
10	8.33E-01	1250	8.10E-04	8.40E-03	8.36E-01
12	9.36E-01	1398	1.02E-03	9.42E-03	9.37E-01
14	1.02E+00	1517	1.20E-03	1.02E-02	1.01E+00
16	1.07E+00	1593	1.33E-03	1.07E-02	1.06E+00
18	1.10E+00	1643	1.41E-03	1.10E-02	1.09E+00
20	1.11E+00	1653	1.43E-03	1.11E-02	1.10E+00
22	1.10E+00	1631	1.40E-03	1.09E-02	1.08E+00
26	1.03E+00	1539	1.25E-03	1.03E-02	1.02E+00
34	8.34E-01	1232	8.12E-04	8.31E-03	8.27E-01
42	6.25E-01	922.5	4.56E-04	6.23E-03	6.20E-01
50	4.47E-01	657.1	2.33E-04	4.45E-03	4.43E-01
60	2.73E-01	400.2	8.67E-05	2.72E-03	2.71E-01
80	2.27E-02	33.5	6.06E-07	2.24E-04	2.23E-02

