

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Porovnání vlivu venkovních vedení a kabelů na souběžně
uložená zařízení**

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení elektromagnetického pole v okolí venkovního vedení a kabelového vedení a jejich následný vliv na souběžně uložená zařízení. V práci využívám program Agros2D pro numerické řešení problému a k následnému získání výsledků potřebných k porovnání vlivu různých typů vedení a kabelů.

Klíčová slova

Venkovní vedení, kabelové vedení, Agros2D, plynovodní potrubí, elektromagnetické pole, numerický model

Abstract

The bachelor thesis is focused on solving the electromagnetic field around outdoor lines and cable lines and the subsequent impact on simultaneously stored equipment. In this thesis I used Agros2D program for the numerical solution of the problem and the subsequent obtaining the results what I needed to compare the effect of different types of lines and cables.

Key words

Outdoor leads, cable lines, Agros2D, gas pipelines, electromagnetic fields, numerical model.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Přemysl Pospíšil

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Lence Šroubové, Ph.D. za cenné rady a doporučení, které mi obětavě poskytla.

Obsah

Seznam symbolů	9
Úvod.....	10
1 Venkovní vedení	11
1.1 Přenosové trojfázové soustavy	11
1.2 Stavba stožáru vvn	12
1.3 Přenos energie	16
1.3.1 Venkovní vedení vvn	16
1.3.2 Kabelové vedení vvn	17
1.4 Zařízení uložená v půdě	17
2 Elektromagnetické pole	18
2.1 Maxwellovy rovnice.....	18
2.1.1 Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru.....	18
2.1.2 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru.....	21
3 Matematický model	22
3.1 Agros2D	23
4 Numerické modely.....	24
4.1 Vedení 400 kV a souběžně uložený plynovod-vertikální závislost.....	24
4.1.1 Vytvoření matematického modelu	25
4.1.2 Získané výsledky	26
4.1.3 Zhodnocení	29
4.2 Vedení 400 kV a souběžně uložený plynovod-horizontální závislost.....	29
4.2.1 Výsledné grafy	29
4.2.2 Zhodnocení výsledků.....	31
4.3 Vedení 400 kV a dva souběžně uložené plynovody.....	31
4.3.1 Výsledné grafy	33
4.3.2 Zhodnocení výsledků.....	34
4.4 Stožár 400 kV typ “Donau “ a souběžně uložený plynovod- vertikální závislost .35	
4.4.1 Výsledné grafy.....	36
4.4.2 Zhodnocení výsledků.....	38
4.5 Stožár 400 kV typ “Donau “ a souběžně uložený plynovod- horizontální závislost	38
4.5.1 Získané výsledky	38
4.5.2 Zhodnocení výsledků.....	40
4.6 Stožár 400 kV typ “Donau “ a dva souběžně uložené plynovody	41
4.6.1 Získané výsledky	41
4.6.2 Zhodnocení výsledků.....	42

4.7	Kabelové vedení a souběžně uložený plynovod	43
4.7.1	Získané výsledky	43
4.7.2	Zhodnocení výsledků	45
4.8	Kabelové vedení a dva souběžně uložené plynovody	45
4.8.1	Získané výsledky	46
4.8.2	Zhodnocení výsledků	47
5	Závěr	48
6	Seznam literatury a informačních zdrojů	50

Seznam symbolů

A (Wb/m)	Vektorový magnetický potenciál
B (T).....	Magnetická indukce
D (C/m ²).....	Elektrická indukce
E (V/m).....	Intenzita elektrického pole
f (Hz)	Kmitočet sítě
H (A/m).....	Intenzita magnetického pole
I (A).....	Elektrický proud
J (A/m ²)	Hustota elektrického proudu
Q (C)	Elektrický náboj
γ (S/m).....	Měrná elektrická vodivost
μ (H/m).....	Permeabilita
μ_r (-)	Relativní permeabilita
Φ (Wb).....	Magnetický indukční tok
Ψ (C)	Elektrický indukční tok

Úvod

V současné době je trendem v energetice slučovat elektrické, plynové a ropovodní sítě a další, na co nejmenším území, je to především z důvodu vysokých výkupních cen pozemků. Tato situace vede ke zjednodušení procesu výkupu pozemku a přípravy oblasti pro vybudování těchto sítí. Negativem však je, že tato blízce umístěná vedení jsou v případě nutnosti oprav složitější. V potaz se musí brát ostatní uložená zařízení z důvodu možného poškození. Rizikem je také bezpečnost samotných pracovníků provádějících údržbu, uložení vedení či stavbu nových přenosových sítí. Problematika tohoto tématu mě zaujala, jelikož jako student energetiky a elektrotechniky, mě vždy zajímala praxe, konkrétně elektromagnetické vlivy vedení velmi vysokého napětí na souběžně k tomu uložená zařízení.

Tato práce se zabývá vlivem venkovního vedení a kabelového vedení o napěťové úrovni 400 kV na souběžně uložená zařízení a to vysokotlakých plynovodů. Zkoumaná potrubí jsou typu DN800, DN1000 a DN1400. Z několika možných typů úložných zařízení jsem si pro tuto práci vybral právě vysokotlaké plynovody a to z důvodu podobností, které můžeme nalézt mezi dalšími druhy (jako je ropovod, vodovod). Pro zjištění, vlivu elektromagnetického pole venkovních vedení či kabelových vedení, je toto dostačující.

Práce je rozdělena do 4 hlavních částí, ve kterých dále dělím práci na příslušné kapitoly. V první části se zabývám teorií problematiky rozdělení a uložení lan, stožáru a kabelových vedení vvn. Další část popisuje pomocí Maxwellových rovnic rozložení elektromagnetického pole kolem venkovního či kabelového vedení. Ve třetí části popisují pracovní prostředí programu Argos2D. Tento program jsem zvolil hned z několika důvodů. Prvním z nich je to, že je volně dostupný pro běžné uživatele, dalším důvodem je, že byl vyvinut na Fakultě elektrotechnické na Západočeské univerzitě v Plzni. V poslední části se věnuji matematickým modelům a jejich různým uspořádání na základě zadaných hodnot a jejich výsledků programu Argos2D. V závěru práce porovnám získané výsledky a vliv venkovního vedení a kabelového vedení na souběžně uložená zařízení v různých geometrických uspořádání.

1 Venkovní vedení

Venkovní vedení se navrhuje po stránce elektrické, ale i po stránce mechanické. Při jeho návrhu hledáme optimum mezi cenou a elektrickými vlastnostmi vlastního vedení. Základním požadavkem při návrhu elektrického vedení je správná volba materiálu pro stožáry a zejména vodičů, na kterých je založen přenos energie. U přenosové soustavy České republiky se můžeme setkat s různými typy stožárů. V každém případě se bude jednat o prostorovou prutovou konstrukci, která bude schopna odolávat zatížením v různých směrech a krouticím momentům způsobených vodiči. Při návrzích se musí samozřejmě počítat s možnou námrazou, větrem, a to vše s ohledem na klimatické podmínky dané oblasti.[1,2]

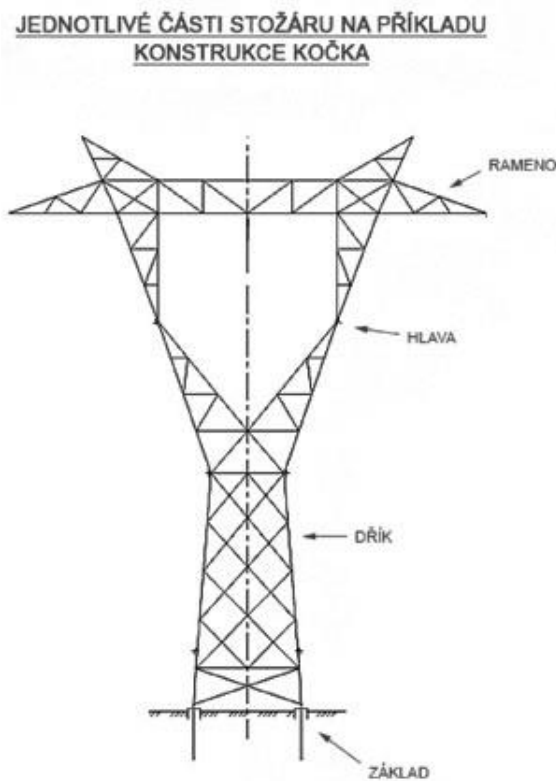
1.1 Přenosové trojfázové soustavy

Elektrizační soustavu můžeme dělit dle napěťové hladiny a to na vedení nn, vn a vvn.

- Vedení nn (nízké napětí)
 - Jmenovité napětí: 0,23 kV; 0,4 kV; 0,5 kV
 - V současné době se vedení nn využívá málo, hlavně v řídké osídlených oblastech a na venkově. Ve městech a v průmyslových oblastech se používají především kabely, které jsou uložena buď v zemi, nebo v kanálech. Na vesnicích se v této době preferují samonosné kabely, které nahrazují klasické venkovní vedení.[1]
- Vedení vn (vysoké napětí)
 - Jmenovité napětí: 6 kV; 10 kV; 22 kV; 35kV
 - Vedení vn nalezneme v nezastavěných oblastech, ve kterých se řeší zejména betonovými stožáry a dočasně se může umístit i na dřevěné stožáry. Tyto stožáry musí být konstruovány s požadavky sdělovací a řídicí techniky tak, aby bylo možné na ně umístit, kromě fázových vodičů také vzdušné kabely nebo fázová lana se světlovodnými vodiči. Při výstavbě vedení musíme klást velký důraz na co nejmenší zásah do rázu krajiny, proto se vyžadují nenápadné a málo rušivé trasy. [1]
- Vedení vvn (velmi vysoké napětí)
 - Jmenovitá napětí: 110 kV; 220 kV; 400 kV
 - Tato vedení tvoří přenosovou soustavu přenášející elektrické výkony od primárních zdrojů (elektrárny) nebo od sekundárních zdrojů (rozvodny) na určitá místa, jako jsou rozvodny vn. Pro vedení vvn se používá trojsvazek z AlFe lan s průřezy $3 \times 500 \text{ mm}^2$ a $4 \times 450 \text{ mm}^2$. [3,1]

1.2 Stavba stožáru vvn

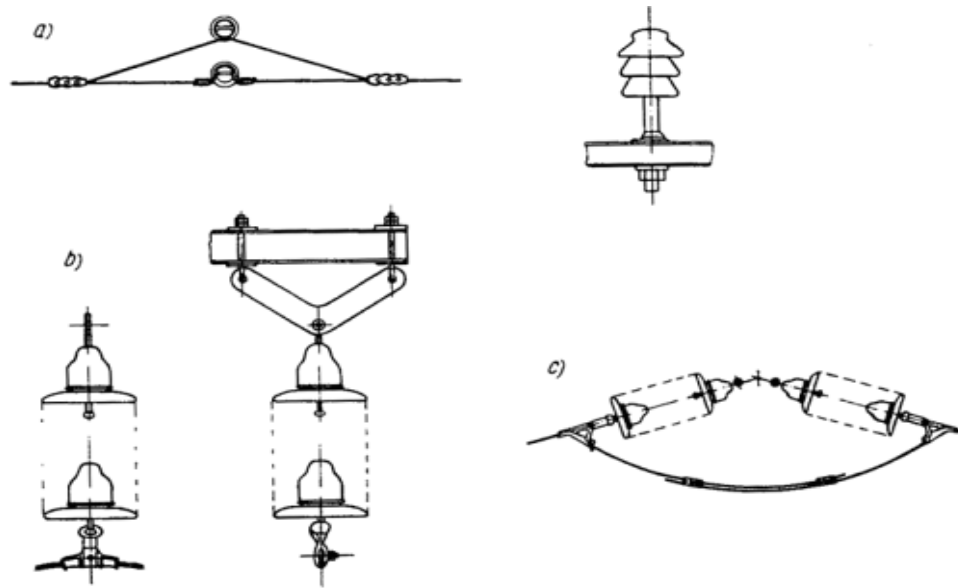
Tělo elektrického stožáru můžeme rozdělit do tří hlavních částí. Je to pata, dřík a hlava stožáru. Pata je ve spodní části stožáru, navazuje na základ stožáru, který tvoří 4 betonové válce o průměru cca 50 cm. Dřík neboli noha stožáru spojuje hlavu stožáru s patou. U většiny stožárů se setkáme s rameny či konzolami, které slouží pro uchycení izolátorových závěsů jednotlivých vodičů elektrického vedení. Na úplném vrcholu stožáru je umístěno zemnicí lano, někdy jich může být více, které slouží mimo jiné také k ochraně před atmosférickým přepětím.



obr. 1- jednotlivé části stožáru

(Zdroj: www.technikaatrh.cz)

Tvar hlavy stožáru ovlivňuje druh a tvar izolátoru či izolátorových závěsů. Podle způsobu namáhání rozlišujeme podpěrné, závěsné a kotevní izolátory (obr. 2). Podpěrné izolátory můžeme nalézt u vedení nn, naopak závěsné izolátory najdeme u stožáru hladin vn a vvn.

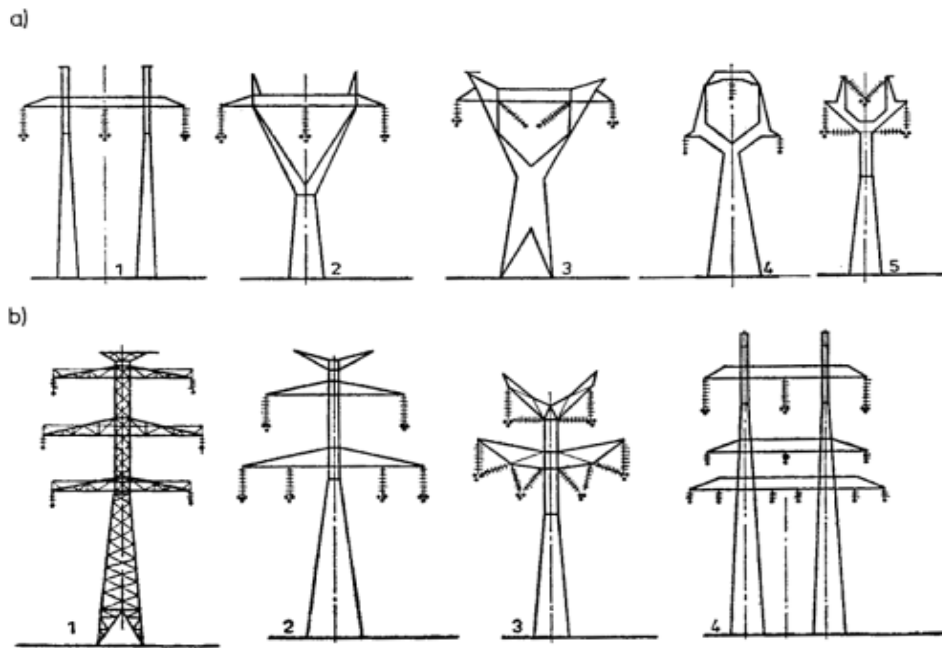


Obr. 2- Izolátory (a-roubíkový, b-nosný izolátorový závěs, c-kotevní závěs

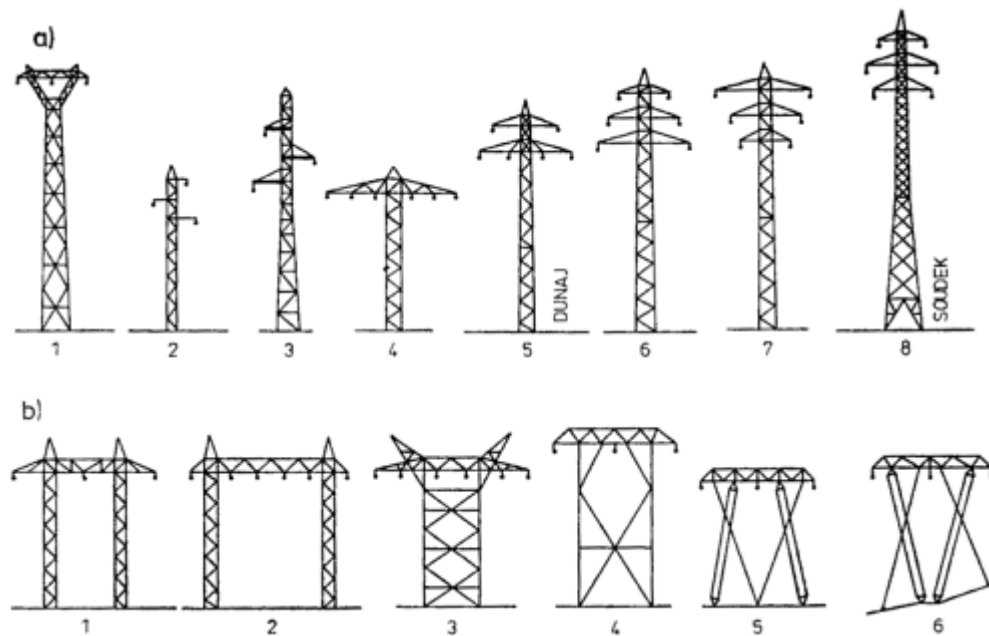
(Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/4170-stozary-vvn-i>)

Typ a tvar stožárů je dán především parametry vedení (výkon, napětí, systém, vodiče a zemnicí lana, izolátory), dále geometrií včetně uspořádání vodičů, zatížením závislým především na vodičích, funkci v trase, větrové a námrazové oblasti, statické soustavě a na konstrukci prvků, použitím materiálu a na způsobu spojování.

Pro napětí 110 kV se používají relativně lehké konstrukce (obr. 3), u 220 kV jsou podobného tvaru, jen jsou vyšší a více namáhány. U 400 kV jsou to těžké konstrukce (obr. 4), kvůli těžkým vodičům. [4]



obr. 3-Typy a tvary stožárů vedení 400 kV.
(Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/4183-stozary-vvn-ii>)



obr. 3- Typy a tvary stožárů vedení 110 kV (220 kV)
(Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/4183-stozary-vvn-ii>)

Dále můžeme rozdělit stožáry podle funkce, a to na nosné, výstužné (kotevní), rohové a speciální.

- **Nosné stožáry:**

- Tyto stožáry můžeme nalézt na přímých úsecích trasy elektrického vedení. Stožáry jsou vybaveny svislými izolátorovými závěsy, protože váha lana působí na stožár jen ve svislém směru. Ve vodorovném směru se tah vodičů navzájem vyruší a tento typ stožáru je namáhán jen atmosférickými podmínkami a to především větrem.

- **Výstužné (kotevní) stožáry:**

- konstrukce těchto stožáru je silnější a mohutnější, už od pohledu je rozeznáme snadno. Jejich počet v trase je závislý na členitosti terénu a postupu montáže vedení. Vodiče jsou ke stožáru připojeny pomocí kotevních izolátorových závěsů, které jsou namáhaný plným tahem lan z každé strany a vodiče jsou propojeny přepojkou, která není mechanicky namáhaná. Stožár musí vydržet 2/3 jednostranného zatížení, které je způsobeno celým tahem lan.

- **Rohové stožáry:**

- Nachází se v lomech tras, přenášejí výslednici sil tahů vodičů včetně námrazy.

- **Ostatní:**

- Dále se můžeme setkat s rozvodnými, odbočnými, koncovými a speciálními stožáry, které vznikají například u velkých vodních překážek.

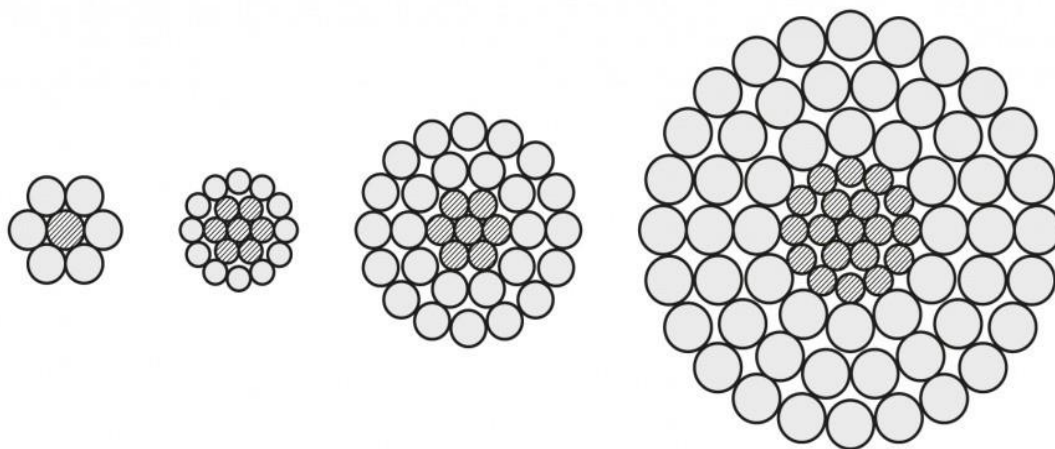
1.3 Přenos energie

Přenos elektrické energie je možný buď za pomoci venkovního, nebo kabelového vedení. V případě venkovního vedení jsou lana uložena na stožárech a u kabelových vedení jsou kabely uloženy v zemi či v uzpůsobených kanálech. Jako základní materiály pro venkovní a kabelové vedení bych zmínil měď a hliník, ale můžeme se setkat také s bronzovými či železnými vodiči. Každý materiál má své pro a proti. Například měď je velmi dobrý vodič, ale pořizovací cena je velmi vysoká.

1.3.1 Venkovní vedení vvn

Nejpoužívanější lana na hladině VVN jsou kombinovaná lana, která jsou tvořena dvěma různými materiály. Jeden z nich vyniká mechanickými vlastnostmi, u AlFe lan to je železo, které tvoří duši lana a nese celou váhu lana a druhý vyniká elektrickými vlastnostmi, u AlFe lan to je hliník, který tvoří plášť lana a tvoří hlavní vodivou část lana. [5]

Na následujícím obrázku je zobrazena struktura kombinovaných AlFe lan různých typů.



obr. 5 – Struktura AlFe lan
(Zdroj: www.ACword.cz)

Kombinovaná lana mají své značení. Značí se dvěma čísly a zkratkou materiálu. Příkladem označení těchto lan může být 90 AlFe 3. První číslo označuje průřez elektrovodné části, tedy hliníku. Druhé číslo označuje poměr nosného (železná část) a elektrovodného (hliníková část) průřezu, přičemž v tom to případě průřez hliníkové části je 90 mm^2 a železná část 30 mm^2 .

Tvar vodičů se může lišit, nejčastěji se setkáme s vodiči slané z drátů kruhového průřezu. To samozřejmě vede ke vzniku dutin mezi jednotlivými vodiči a prohlubní na povrchu vodiče, které jsou nežádoucí a vedou ke snížení životnosti vodiče důsledkem snazší koroze. Proto se můžeme setkat v dnešní době s tím, že dráty vodiče nejsou kruhového profilu ale profilu tvaru Z nebo se segmentovými lany.

V dnešní době se stále více preferují izolované vodiče a to z důvodu zmenšení poruchovosti vedení. Vedení není tolik náchylné na spadané větve, které jsou často příčinou zkratů na vedení a lépe odolávají atmosférickým podmínkám. Díky vyšší izolační schopnosti mohou být vodiče blíže sebe a mohou být blíže u země. To vede ke zmenšení stožárů a tím pádem i menšímu zásahu do krajiny. Tyto vodiče se vyrábějí z hliníkové slitiny, jsou slaňované a komprimované, což snižuje jejich průměr. Používají se především na vedení 35 a 110 kV. Izolace je vyrobena ze zasíťovaného polyetylenu (XLPE).[5]

1.3.2 Kabelové vedení vvn

V současné době rozvod 22 kV není postačující pro zásobování energií velkých měst, a proto se přechází na hladinu vvn. V městských a průmyslových aglomeracích, nelze řešit rozvodnou síť pomocí venkovního vedení, musíme proto použít kabelová vedení.

Používáme převážně hliníkové či měděné kabely s polyetylenovou izolací v jednožilovém provedení. Jestliže průřez vvn kabelu přesáhne 630 mm^2 , je nutno skládat duši ze segmentů, které jsou od sebe lehce izolovány. Segmenty snižují ztráty skinefekttem.

1.4 Zařízení uložená v půdě

V dnešní době je většina potrubí, jako jsou plynovody, ropovody, vodovody a další, vyrobené z oceli. V budoucnu můžeme počítat spíše s rozmachem plastových potrubí, která nepodléhají korozi a elektromagnetickým jevům. Všechna tato potrubí můžeme nalézt v půdě i nad zemí a to obvykle buď 1 až 3 metry hluboko nebo vysoko nad zemským povrchem. Já se zaměřím na plynovodní potrubí typu DN800, DN1000 a DN1400. Tyto potrubí tvoří tranzitní soustavy plynovodů na území České republiky v délce přes 2400 kilometrů. Převážná kapacita české části tranzitního plynovodu v předávací stanici Lanžhot je cca 50 mld. m^3/rok , z toho spotřeba České republiky činí 20 % a zbylých 80 % je určena pro tranzit do západní Evropy[9]. Také se můžeme setkat s kabelovým vedením uloženým v půdě, to se pokládá do hloubky 1,3 metru u napěťové hladiny 220 kV.

2 Elektromagnetické pole

Zdrojem elektromagnetického pole, mohou být proudy ve vodičích, které indukují ve svém okolí. Elektromagnetické pole je fyzikální pole, které se skládá ze dvou fyzikálně propojených polí a to elektrického pole a magnetického pole. Toto pole, které je rozloženo v prostoru se může s časem měnit.

2.1 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice jsou základními uznávanými pravidly elektromagnetického pole. Vznikly díky Faradayovým experimentům a jsou plně potvrzeny v praxi. Tyto rovnice můžeme formulovat jak v integrálním tvaru, tak i v diferenciálním tvaru. Integrální tvar popisuje elektromagnetické pole v určité prostorové oblasti, naopak diferenciální tvar popisuje elektromagnetické pole v určitém bodu této oblasti.[7]

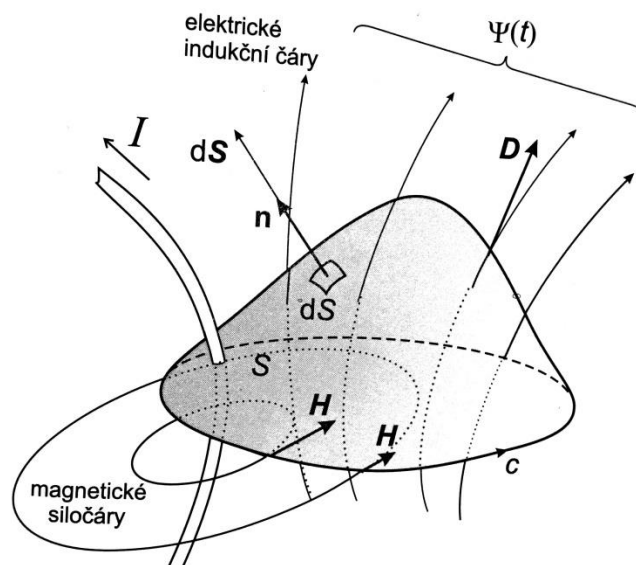
2.1.1 Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru

- 1. Maxwellova rovnice (někdy nazývaná Zákonem celkového proudu, anebo zobecněným Amperovým zákonem):

$$\oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}, \text{ kde } \Psi = \int_S \mathbf{D} d\mathbf{S} \quad (2.1)$$

Vektor \mathbf{H} se pohybuje po orientované uzavřené křivce c , a je roven celkovému součtu všech vodičových proudů I a posuvného proudu $\frac{d\Psi}{dt}$. Tyto proudy jsou s křivkou c spřaženy. Plocha S , kterou ohraničuje křivka c , jsou vzájemně orientovaný pravotočivě, jak lze vidět na obr. 2.1.

Výraz na levé straně rovnice se nazývá oběhové magnetické napětí v orientované smyčce c a proudy na pravé straně bereme kladně, jestliže mají souhlasný směr s normálou plochy S , jinak proudy bereme záporně.[7]

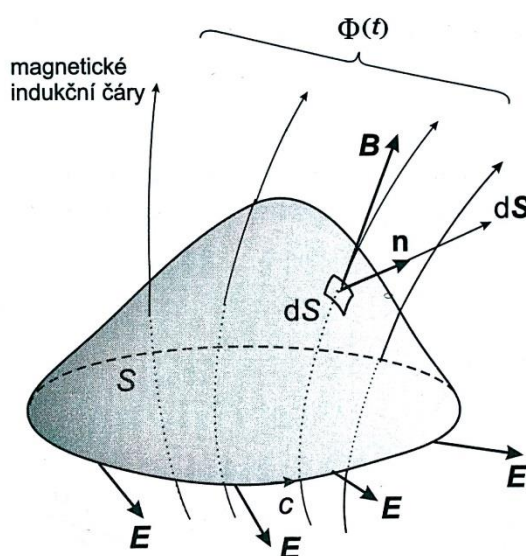


Obr. 2.1. K první Maxwellově rovnici v integrálním tvaru.[7]

- 2. Maxwellova rovnice (také Faradayův zákon):

$$\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}, \text{ kde } \Phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} \quad (2.2)$$

Pohyb vektoru \mathbf{E} po libovolně orientované a uzavřené křivce c je roven záporné derivaci magnetického indukčního toku, který je spřažen s křivkou c . Opět jsou křivka c a plocha S , kterou křivka ohraničuje, orientované pravotočivě (obr. 2.2). Integrál $\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l}$ se nazývá indukované napětí a značíme jej u_i .

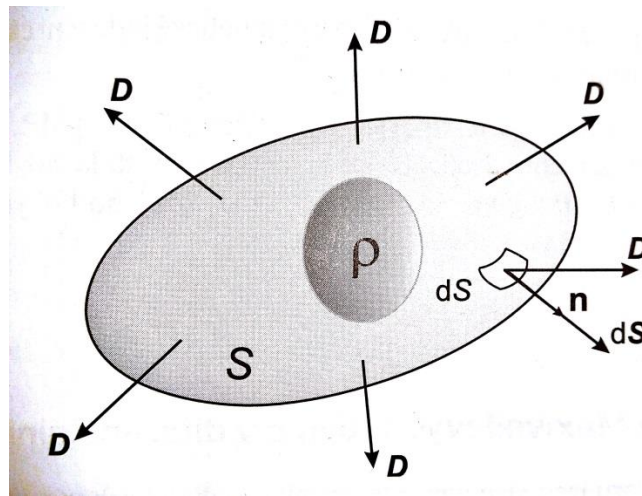


Obr.2.2. K druhé Maxwellově rovnici v integrálním tvaru.[7]

- 3. Maxwellova rovnice (též Gaussova věta):

$$\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q, \text{ kde } Q = \int_V \rho dV \quad (2.3)$$

Říká, že elektrický indukční tok uzavřenou plochou S je roven celkovému náboji v oblasti V ohraničenou plochou S (obr. 2.3). Elektrické pole popsáno třetí Maxwellovou rovnicí je pole zřídlové, což znamená, že z kladně nabitých těles vychází elektrické indukční čáry a vstupují do záporně nabitých těles. Tyto čáry jsou tedy neuzavřené.

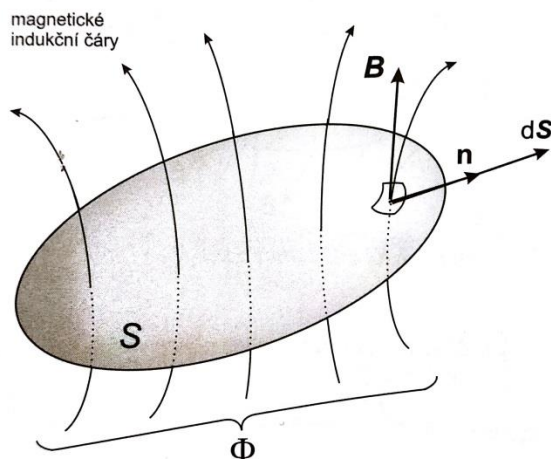


Obr. 2.3. Ke třetí Maxwellově rovnici v integrálním tvaru[7]

- 4. Maxwellova rovnice - též zákon spojitosti magnetického indukčního toku:

$$\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0 \quad (2.4)$$

Rovnice vyjadřuje magnetický indukční tok přes libovolnou uzavřenou plochou S a je roven nule (obr. 2.4). Musí platit, že tok vstupující do plochy a tok z ní vystupující se musí rovnat. Magnetické pole je nezřídlové, protože neexistuje magnetický náboj a tudíž jsou indukční čáry uzavřené.[7]



Obr. 2.4. Ke čtvrté Maxwellově rovnici v integrálním tvaru

2.1.2 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru jsou používány v technických výpočtech, neboť ve výpočtech je výhodnější pracovat s diferenciálním tvarem.

- 1. Maxwellova rovnice:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.5)$$

Z rovnice vyplývá, že rotace vektoru intenzity magnetického pole \mathbf{H} je rovna hustotě vodivého proudu \mathbf{J} a veličině $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$. Magnetické pole je obecně vírové.

- 2. Maxwellova rovnice:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Časová derivace vektoru magnetické indukce \mathbf{B} , se rovná rotaci vektoru intenzity elektrického pole \mathbf{E} . Toto pole je vírové.

- 3. Maxwellova rovnice:

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (2.7)$$

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

- 4. Maxwellova rovnice:

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.8)$$

Divergence vektoru magnetické indukce je nulová. Toto magnetické pole je nezřídlové.[7]

Dále zde uvedu materiálové vztahy nedílnou součástí Maxwellových rovnic:

- Elektrická indukce \mathbf{D}

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad [\text{C/m}^2] \quad (2.9)$$

- Intenzita magnetického pole \mathbf{H}

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu \quad [\text{A/m}] \quad (2.10)$$

- Proudová hustota \mathbf{J}

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad [\text{A/m}^2] \quad (2.11)$$

3 Matematický model

Při časových změnách odpovídající frekvenci 50 Hz lze zanedbat posuvný proud, což je druhý člen pravé strany první Maxwellovy rovnice. Pak Maxwellovy rovnice mají tvar:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3.1)$$

Uvažujme kartézský souřadnicový systém. V jednotlivých oblastech předpokládáme lineární prostředí, tj. $\mu = \text{konst.}$, $\gamma = \text{konst.}$ Také předpokládáme harmonický průběh proudu, to umožňuje přejít na symbolicko-komplexní zobrazení. Rozložení elektromagnetického pole můžeme popsat parciální diferenciální rovnicí pro fázor magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} , za předpokladu využití vztahu $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ a $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$, ve tvaru:

$$\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{A}) + j\omega\gamma \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (3.2)$$

Kde \mathbf{J}_{ext} je vnější proudová hustota. Definujeme dvojrozměrnou oblast Ω . Na hranici oblasti platí, že okrajová podmínka je:

$$A_z = 0. \quad (3.3)$$

3.1 Agros2D

Agros2D je program pro numerické řešení fyzikálních polí s možností jejich vzájemného sdružování. A to polí elektrických, elektrických proudových, magnetických a teplotních polí v kartézském a osově symetrickém uspořádání. Agros2D umožňuje analýzu ustáleného stavu, řešení nelineárních problémů, harmonického ustáleného stavu a přechodovou analýzu. V elektrostatickém poli je možné využít funkci sledování pohybu částic. Agros2D podporuje skriptování pomocí jazyka Python. Program je vyvíjen skupinou matematicko-fyzikálního modelování. Je určena pro vědecké pracovníky, inženýry, studenty a všechny, kdo se zabývají řešením fyzikálních polí. Aplikace je vyvíjena s důrazem na jednoduchost a snadnost použití a přitom co největší komplexnost. Argos2D má 3 základní moduly, a to preprocessor, procesor a postprocesor

- Preprocessor

Tato část slouží vytvoření geometrického návrhu řešeného problému a definování materiálu a okrajových podmínek. Geometrii lze také nakreslit v CAD programu a importovat pomocí formátu DXF. Dále zde nalezneme základní operace pro práci s uzly, hranami a značkami oblastí, jako jsou například geometrické transformace (posun, otočení a zvětšení).

- Processor

K určení geometrie řešeného problému je využíván program Triangle, který umožňuje vytvoření vysoce kvalitní nestrukturované trojúhelníkové sítě. Procesor využívá při výpočtu elementy vyššího řádu přesnosti a automatickou *hp*-adaptivitu, což znamená automatické zjemnění sítě a řádu polynomu na elementu dle potřeby.

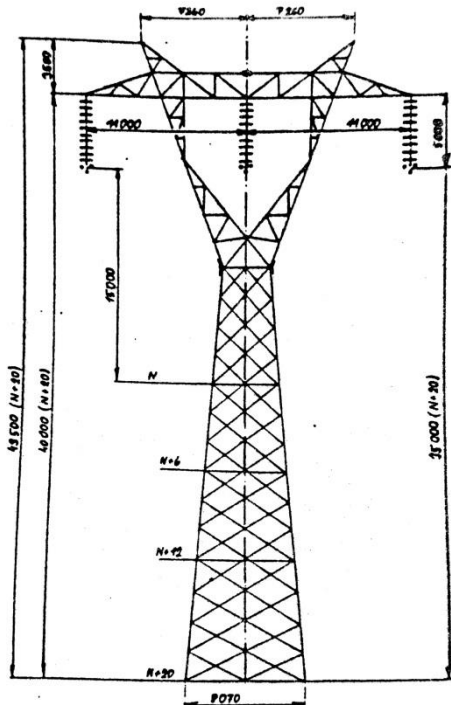
- Postprocessor

Tato poslední část programu, slouží k analýze vypočtených dat. Lokální veličiny můžeme zobrazit pomocí grafu v závislosti na souřadnicích nebo u přechodného děje v čase. Dále můžeme získané hodnoty zobrazit pomocí barevných map a vektorů nebo dále zpracovat jako povrchové a objemové integrální veličiny charakterizující dané pole.[6]

4 Numerické modely

4.1 Vedení 400 kV a souběžně uložený plynovod-vertikální závislost

Jako první případ sem si vybral analýzu příhradového jednodřívového stožáru 400 kV, typ



Obr. 4.1 Stožár "Kočka" 400 kV [1].

"Kočka", který je zobrazen na obr. 4.1, a souběžně uloženého plynovodního potrubí typu DN1400, DN1000 nebo DN800. Tyto vyjmenované typy plynovodních potrubí jsou nejpoužívanější v České republice [9]. Tloušťku potrubí DN1400 jsem zvolil 30 mm, u potrubí DN1000 25 mm a u potrubí DN800 20 mm. Mým cílem je porovnávat, jak se bude měnit vliv elektromagnetického pole na různá potrubí, která budou vždy uložena na shodném místě. Plynovodní potrubí je umístěno 16 metrů od osy stožáru a jeden metr pod zemí. Na stožáru typu "Kočka" je použit trojsvazek $3 \times 450 \text{ mm}^2$ z AlFe6 lan [1]. Jednotlivá lana ve trojsvazku jsou od sebe vzdálená 40 cm.

V práci budu posuzovat závislost magnetické indukce B , proudové hustoty J , elektrické intenzity E a

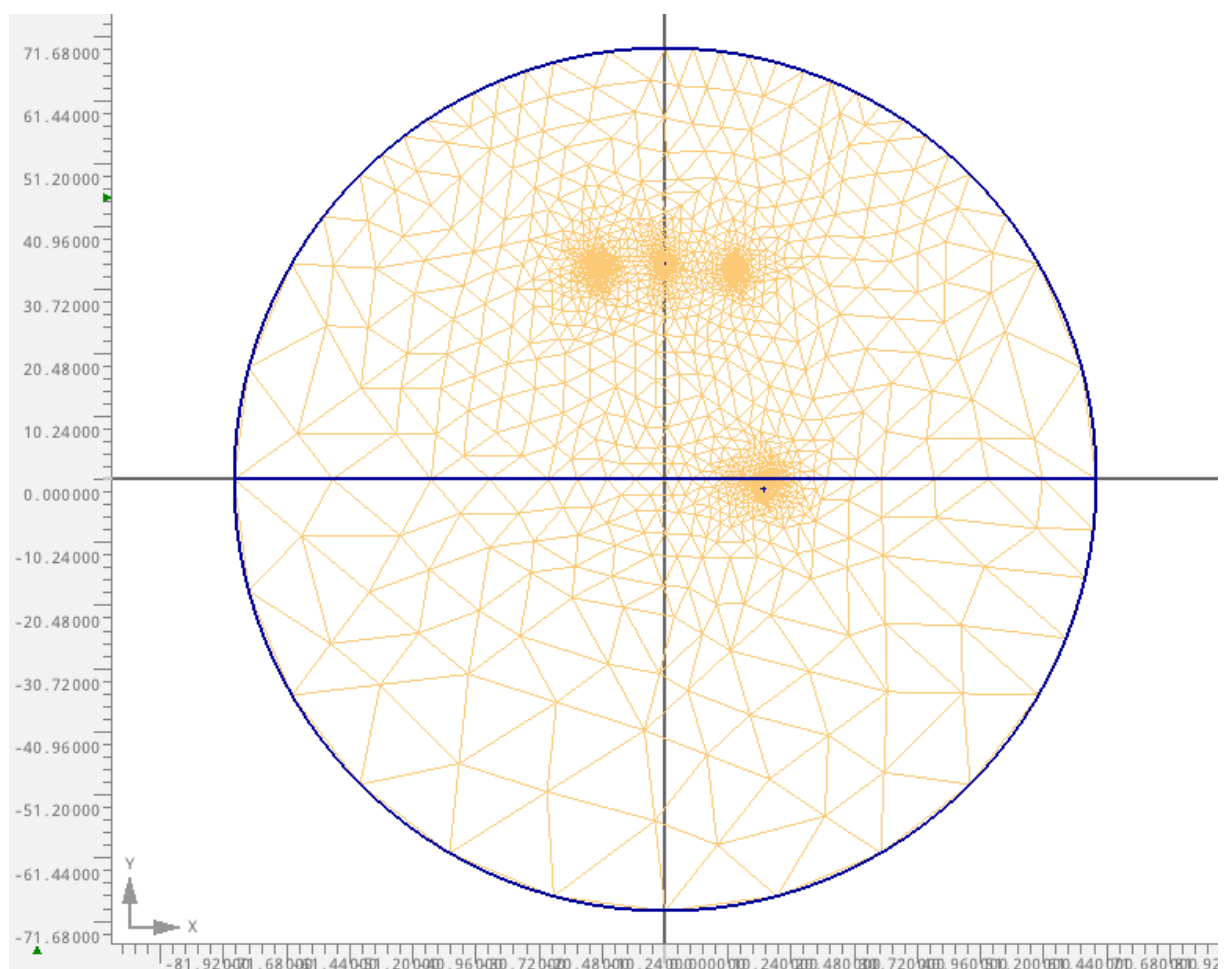
činných ztrát v potrubí na výšce vodičů vvn stožáru. Výška vodičů se bude pohybovat s krokem 2-5 metrů v rozmezí 35 metrů až 8 metrů, což je nejmenší přístupná vzdálenost mezi zemí a vedením o napětí 400 kV [1].

Hodnoty použité v matematickém modelu, najdeme v následující tabulce.

	Měrná vodivost (S/m)	Relativní permeabilita (-)
Železo	9.93×10^6	8000
Hliník	37.7×10^6	1
Voda	0.005	0.99
Půda	0.001	1
Vzduch	0	1
Měď	58.1×10^6	0.99

4.1.1 Vytvoření matematického modelu

V této části kapitoly zmíním postup vytvoření numerického modelu. Nejprve jsem si vytvořil geometrický model, s příslušnými rozměry v preprocesoru. Do vytvořeného modelu jsem zadal materiálové konstanty, jako jsou permeabilita a vodivost, různých částí modelu. Dále jsem vypočítal proud ve vodičích. Ten jsem vypočítal z přirozeného výkonu vedení, který jsem stanovil na 600 MW. Nesmíme zapomenout na okrajovou podmínku, kterou definujeme na obvodu dostatečně velké pracovní oblasti (3.3). Dalším neméně důležitým krokem je vytvořit trojúhelníkovou síť, kterou lze zjemnit na určitých částech modelu, tuto síť vytvoříme pomocí funkce “Mesh area“. Síť vytvořenou přímo pro můj model můžeme vidět na obr. 4.2.

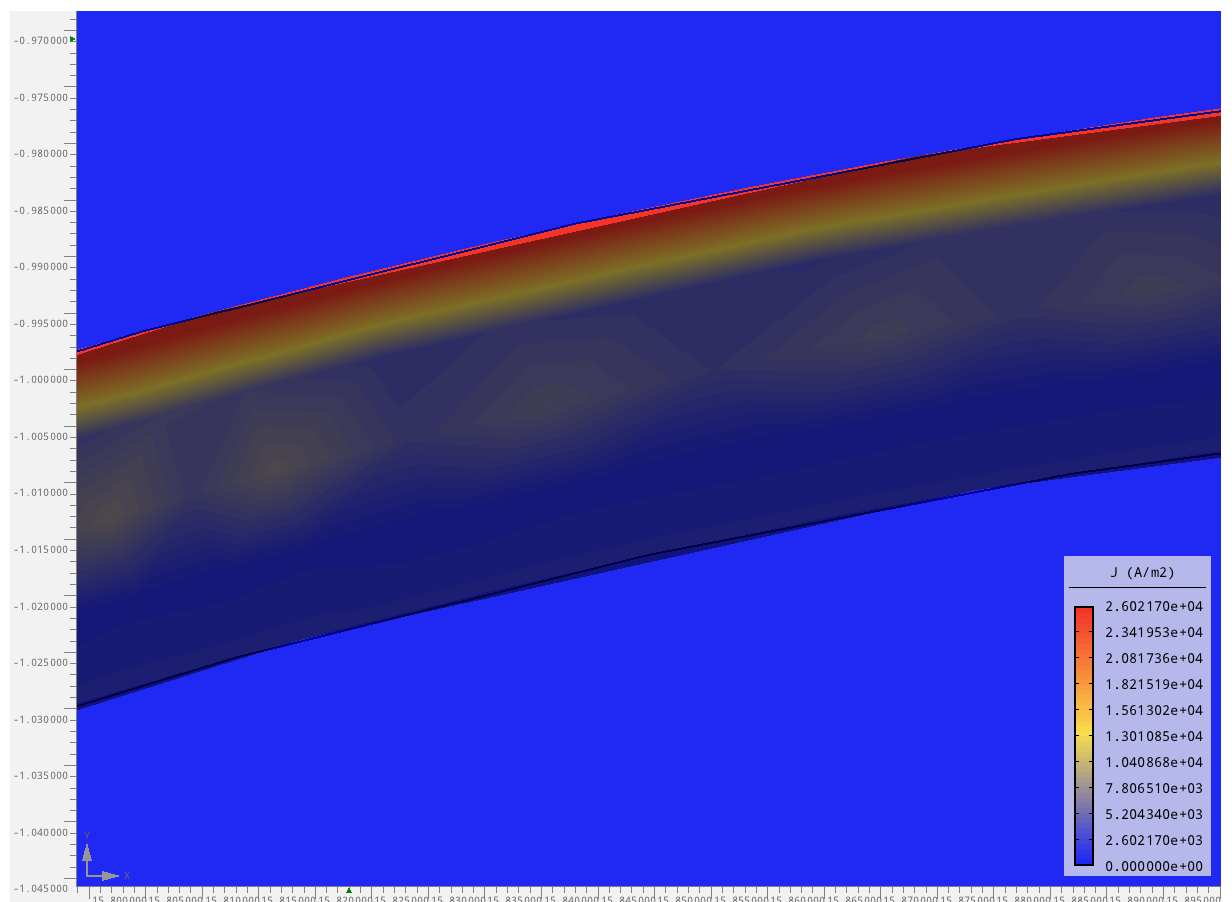


Obr. 4.2. Trojúhelníková síť v Argosu2D.

Dále jsem nechal úlohu vypočítat a poté vykreslit magnetické pole v definované oblasti, za pomoci postprocesoru. Nyní můžeme pomocí objemových integrálů odečíst potřebné veličiny, zjistím proudovou hustotu \mathbf{J} , činné ztráty, magnetickou indukci \mathbf{B} v plášti

potrubí v závislosti na výšce stožáru a elektrickou intenzitu dopočítám dle vzorce $E = \frac{J}{\gamma}$, a vynesu do grafu.

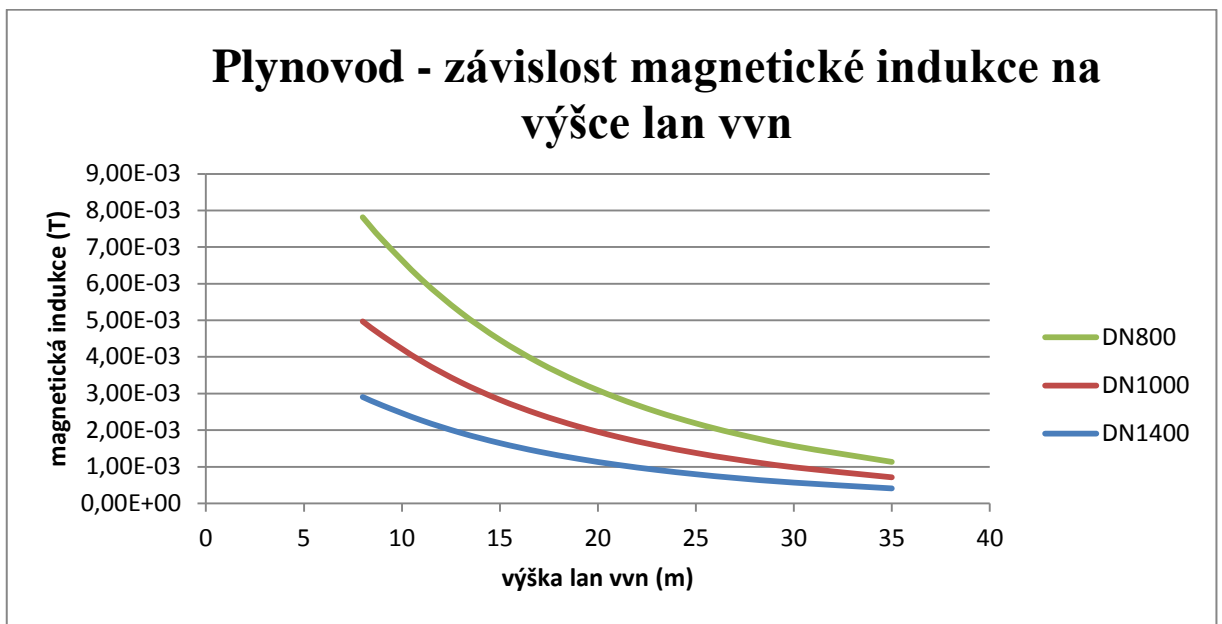
Rozložení proudové hustoty v plášti potrubí lze vidět na obr. 3.3, zde je patrné, že se vyskytuje skin efekt, což znamená, že největší proudová hustota je na povrchu plynovodního potrubí. Já jsem odečítal hodnoty zmíněných veličin vždy v jednom bodě, a to jednu desetinu milimetru pod povrchem pláště a následně jsem to celé promítl do grafů. Všechny parametry zůstaly nezměněné, jen výška vvn vedení se měnila.



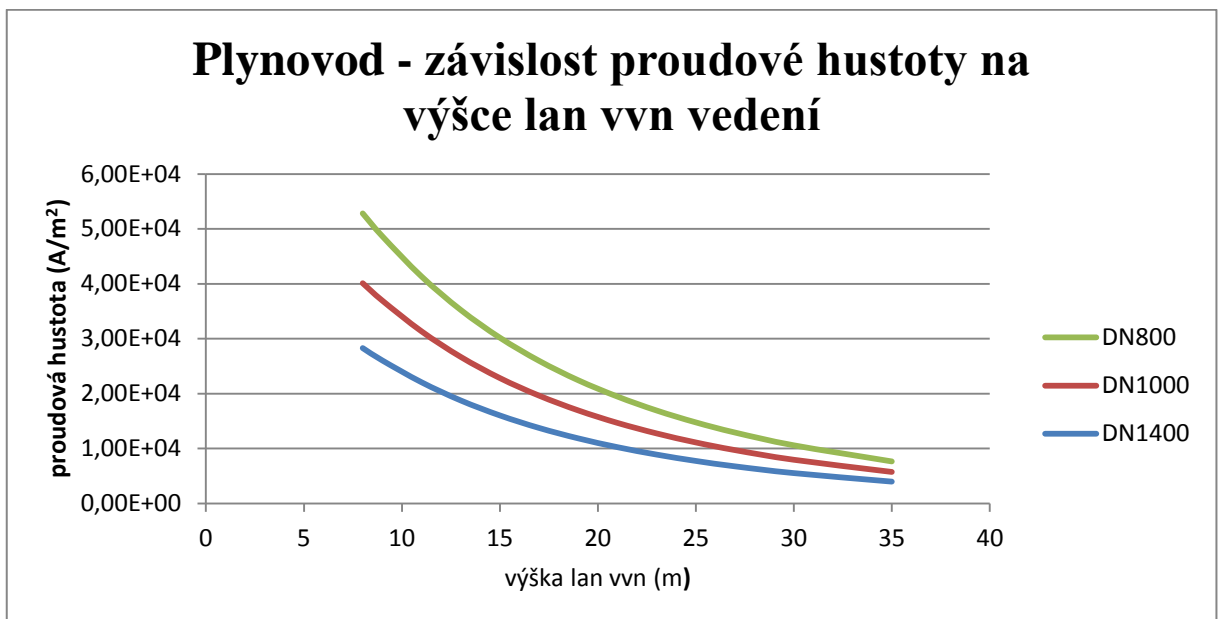
Obr. 4.3 Rozložení proudové hustoty v plášti plynovodního potrubí.

4.1.2 Získané výsledky

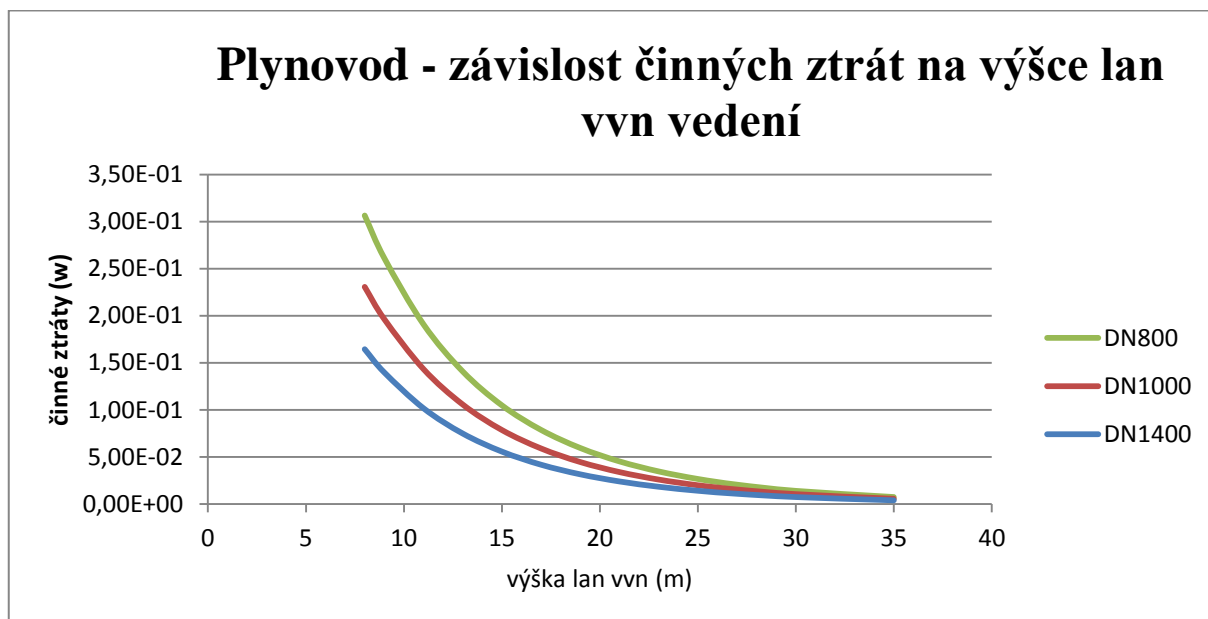
Z dosažených hodnot je patrné, že s nižší výškou vedení roste proudová hustota J , dále intenzita magnetického pole E , magnetická indukce i činné ztráty. Nejvyšší proudová hustota byla naměřena u potrubí DN800, když vedení vvn bylo v osmi metrech nad úrovní terénu a to $52.8 \frac{kA}{m^2}$. Následující grafy zobrazují závislost jednotlivých veličin na výšce uložení lan vedení vvn.



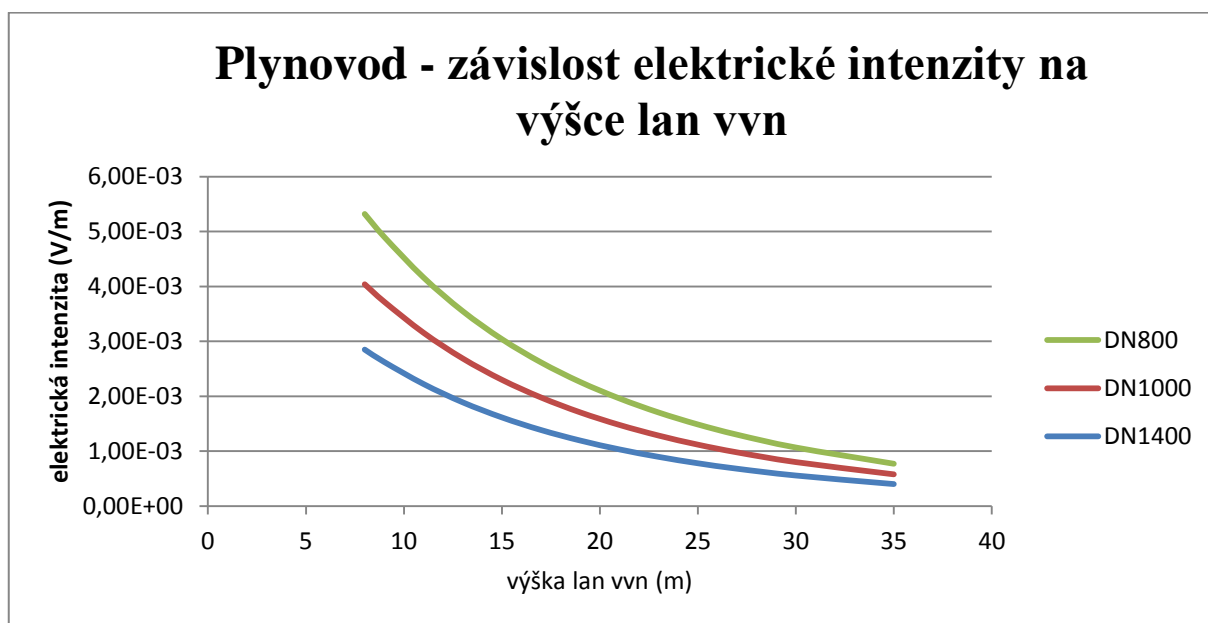
Obr. 4.4. Závislost magnetické indukce na výšce lan vedení vvn.



Obr. 4.5. Závislost proudové hustoty na výšce lan vedení vvn.



Obr. 4.6. Závislost činných ztrát na výšce lan vedení vvn.



Obr. 4.7. Závislost činných ztrát na výšce lan vedení vvn.

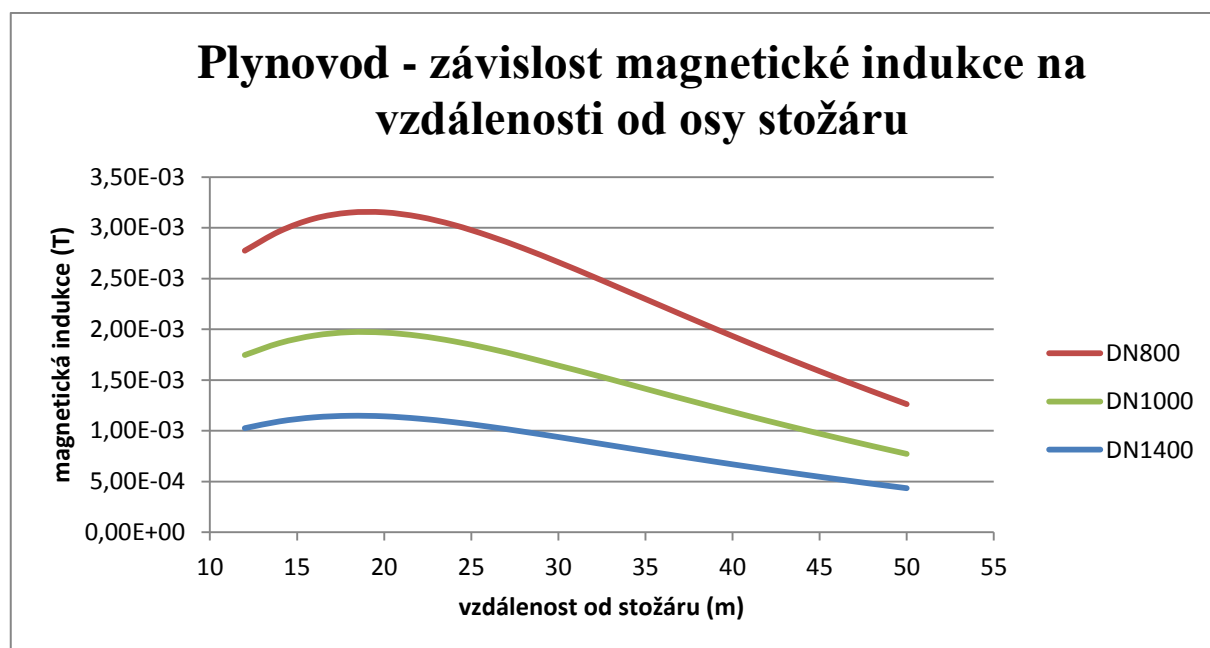
4.1.3 Zhodnocení

Ze simulace modelu vedení 400 kV a souběžně uložený plynovod ve vertikální závislosti lze vidět, že průběh všech grafů je klesající, tedy že veličiny, které jsem odečítal, klesají se zvyšující se výškou uložení lan vvn vedení. Z grafů lze dále vidět, že nejvyšší hodnoty se objevují u plynovodního potrubí DN800. Z toho vyplývá, že čím budeme mít větší průměr potrubí, tím pádem i tloušťku potrubí, tak proudová hustota J , magnetická indukce B , elektrická intenzita E a činné ztráty budou klesat.

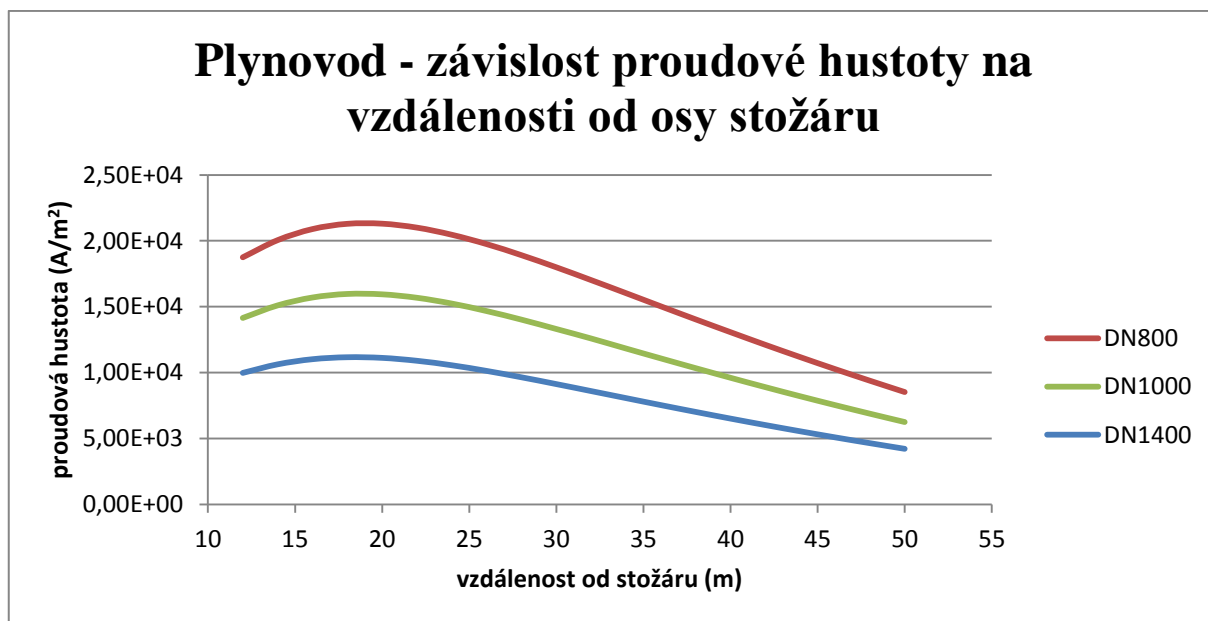
4.2 Vedení 400 kV a souběžně uložený plynovod-horizontální závislost

Jako další případ pro analýzu jsem si vybral obdobnou situaci, která již byla popsána v kapitole 4.1, kde se jednalo o vertikální závislost mezi vodiči vvn vedení a plynovodů uložených v půdě. Nyní budu stejným postupem sledovat horizontální závislost těchto veličin. Rozměry stožáru, potrubí i všechny veličiny zůstanou stejné jako v předchozím případě, jen vedení vvn bude uloženo ve fixní výšce a to 20 metrů nad zemí. Potrubí budu měřit ve vzdálenostech od 12 metrů do 50 metrů od osy stožáru s krokem 2 metrů. Budu zjišťovat v jaké vzdálenosti od osy stožáru je největší vliv elektromagnetického pole na plynovodní potrubí.

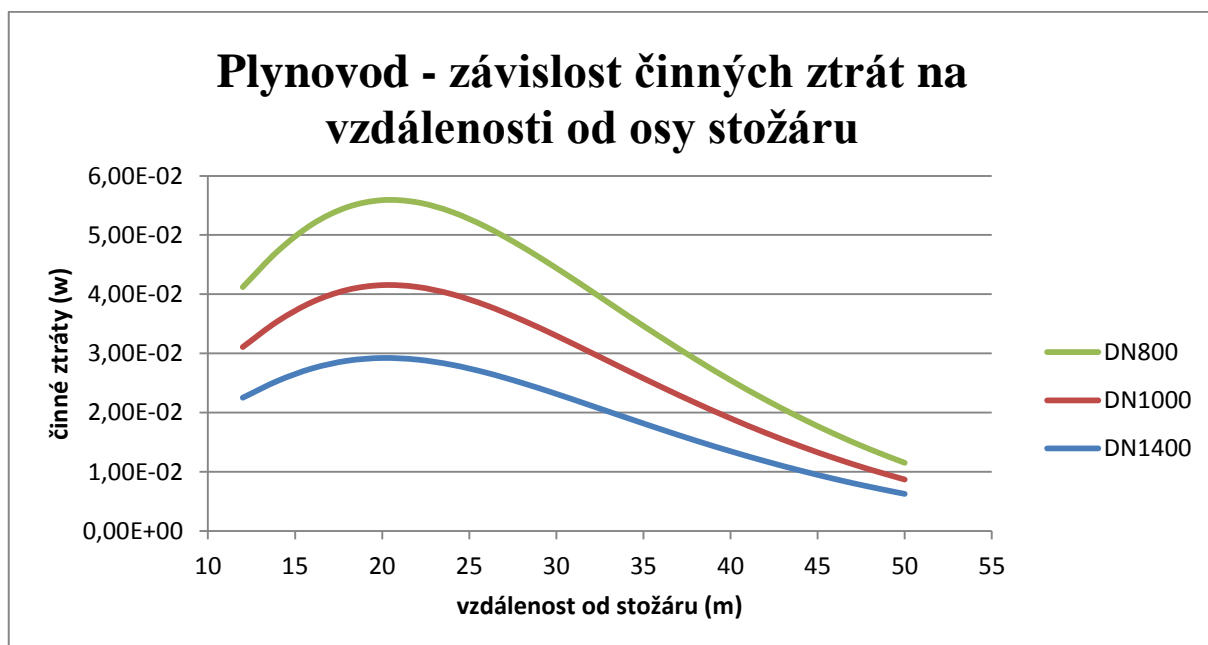
4.2.1 Výsledné grafy



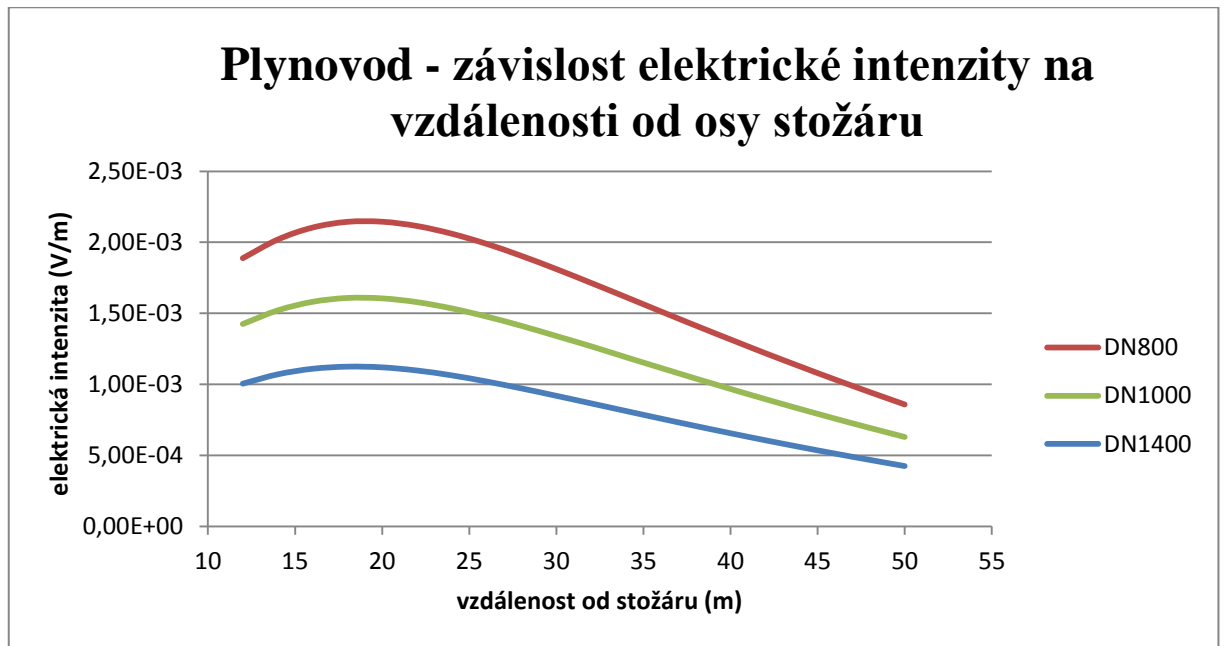
Obr. 4.8. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od osy stožáru v potrubí.



Obr. 4.9. Závislost proudové hustoty na vzdálenosti od osy stožáru v potrubí.



Obr. 4.10. Závislost činných ztrát na vzdálenosti od osy stožáru v potrubí.



Obr. 4.11. Závislost elektrické intenzity na vzdálenosti o osy stožáru v potrubí.

4.2.2 Zhodnocení výsledků

Z grafů je zřejmé, že proudová hustota J na povrchu pláště plynovodního potrubí neklesá se vzdáleností od osy stožáru, jak by si většina z nás mohla myslet. Naopak ve vzdálenosti od 12 metrů do 20 metrů proudová hustota roste na maximální naměřenou hodnotu $8,12 \frac{kA}{m^2}$ a poté už zase klesá až na poslední naměřenou hodnotu $3,66 \frac{kA}{m^2}$, která je pro vzdálenost 50 metrů od osy stožáru.

Ten to jev je způsobený vzájemným sčítáním a odečítáním elektromagnetického pole jednotlivých fází vedení. Zase je zde vidět, jako u numerického modelu v kapitole 4.1, že plynovodní potrubí o větším průměru má znatelně menší proudovou hustotu na povrchu potrubí než potrubí s menším průměrem.

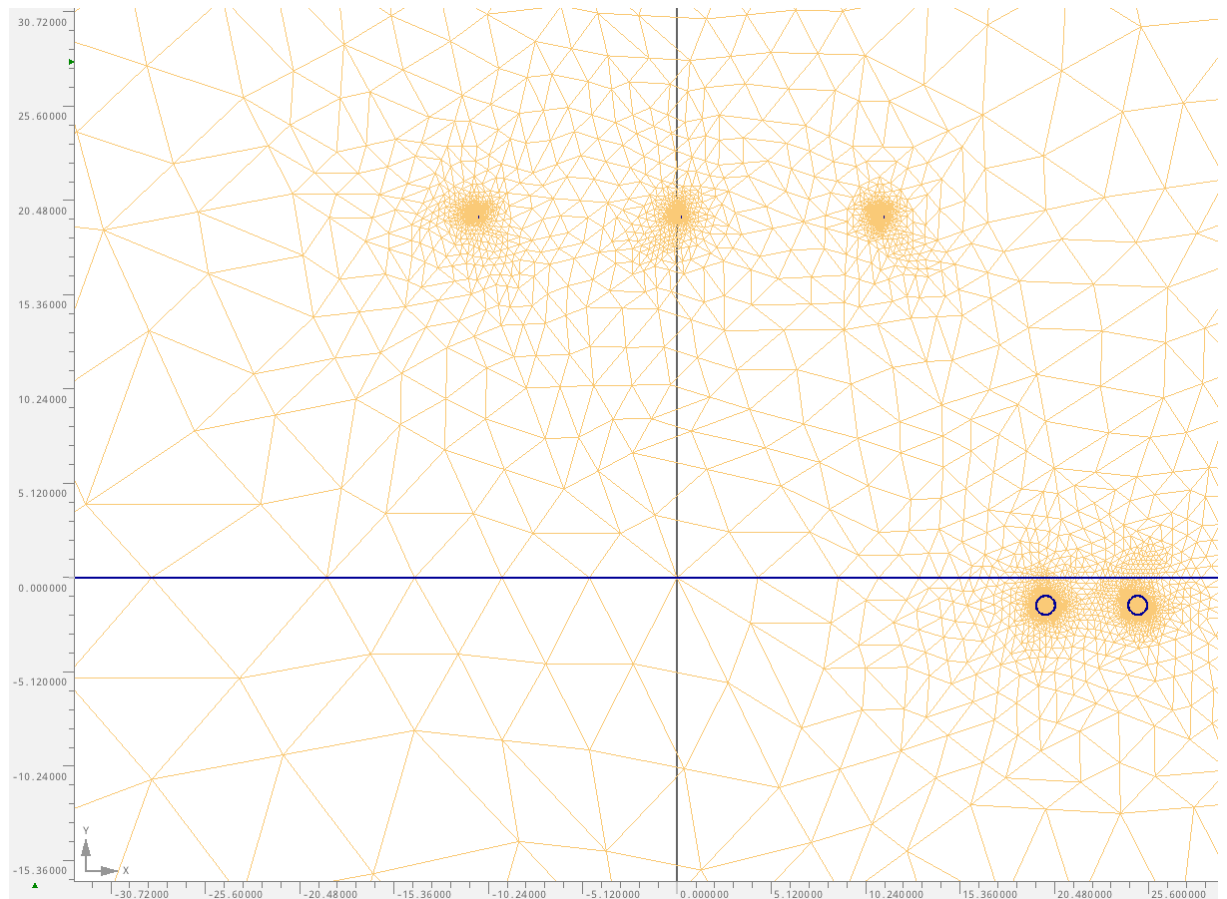
4.3 Vedení 400 kV a dva souběžně uložené plynovody

V dnešní době vysokých výkupních cen pozemků, se stále častěji prosazuje pokládání co nejvíce přenosových sítí, kabelů a potrubí na co nejmenší prostor, proto se teď zaměřím na vliv vedení 400 kV na dvě souběžně uložená plynovodní potrubí DN1000.

Vedení uvažuji ve 20 metrech nad zemí. První potrubí označeno písmenem “A“ jsem umístil také dvacet metrů od osy stožáru a jeden metr hluboko. Druhé potrubí označeno písmenem “B“ je stejných parametrů jako potrubí “A“. Toto plynovodní potrubí jsem umístil ve 22 metrech od osy stožáru s krytím jeden metr, tím pádem mezi oběma potrubími vznikla

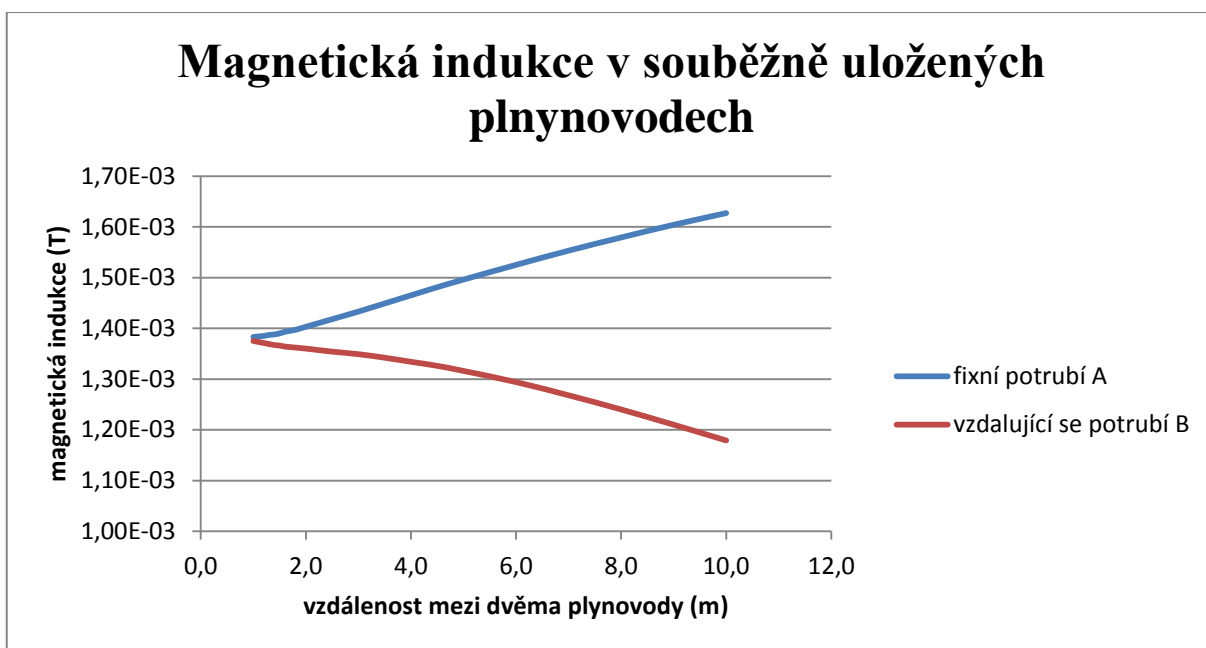
vzdálenost přibližně jeden metr. Tuto vzdálenost jsem po přiměřených intervalech zvětšoval až na deset metrů. Numerický model vytvořený v Adrosu2D s vykreslenou trojúhelníkovou sítí můžeme vidět na obr. 4.12.

Budu pozorovat, jak se bude měnit proudová hustota, magnetická indukce, elektrická intenzita a činné ztráty v souběžně uložených plynovodních potrubí ve vzdálenostech 1 až 10 metrů mezi sebou.

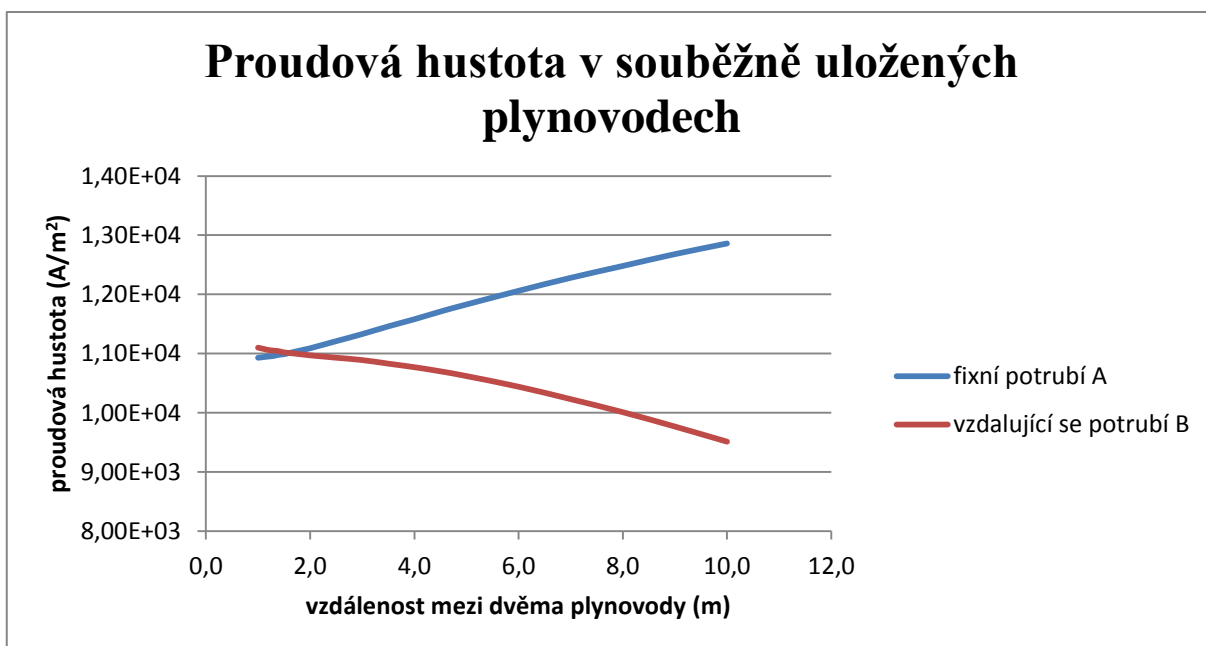


Obrázek 4.12. Vykreslená síť k modelu v kapitole 4.3.

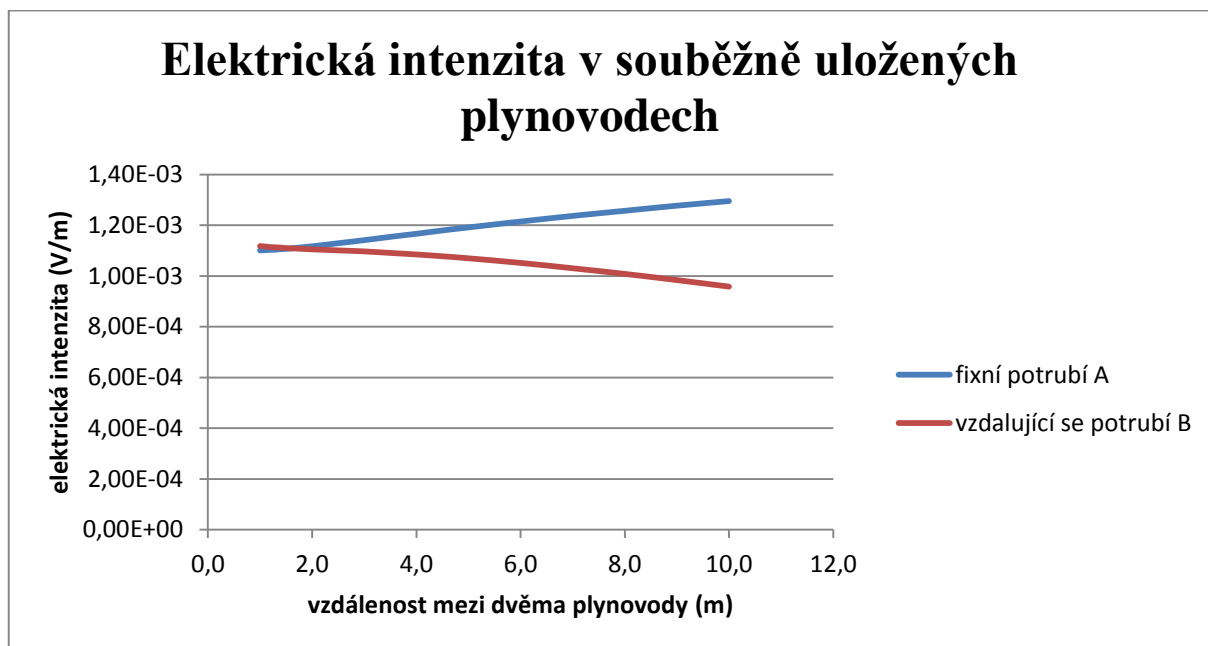
4.3.1 Výsledné grafy



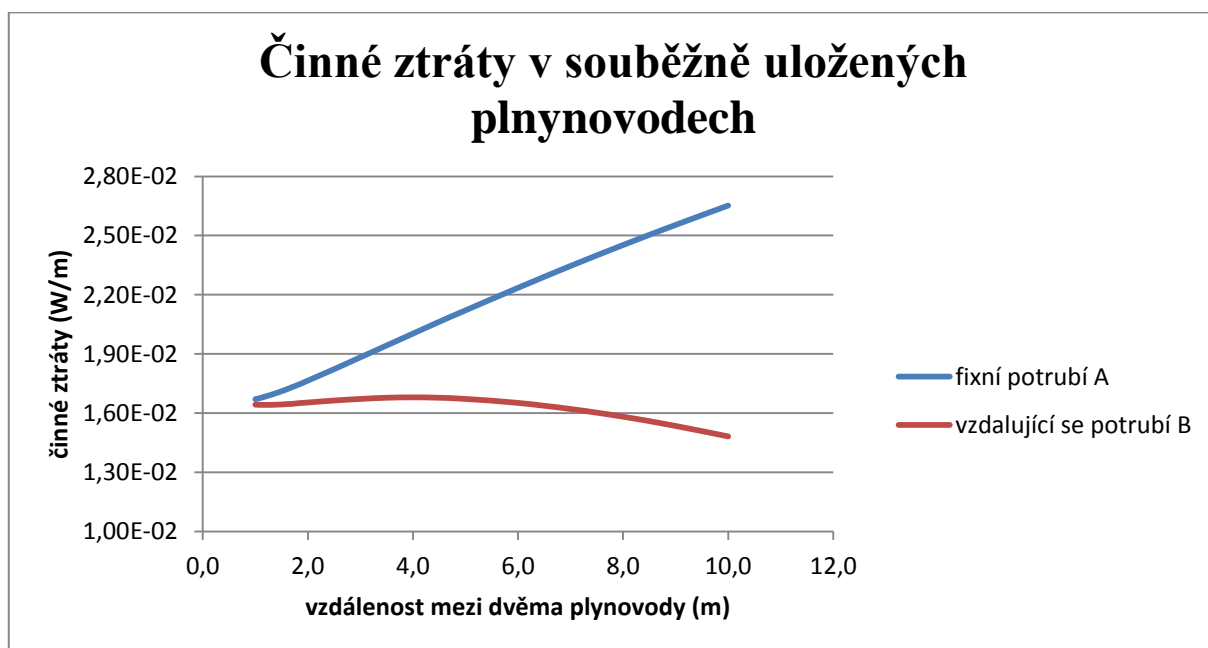
Obrázek 4.13. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti dvou potrubí.



Obrázek 4.14. Závislost proudové hustoty na vzdálenosti dvou potrubí.



Obrázek 4.15. Závislost elektrické intenzity na vzdálenosti dvou potrubí.



Obrázek 4.16. Závislost činných ztrát na vzdálenosti dvou potrubí.

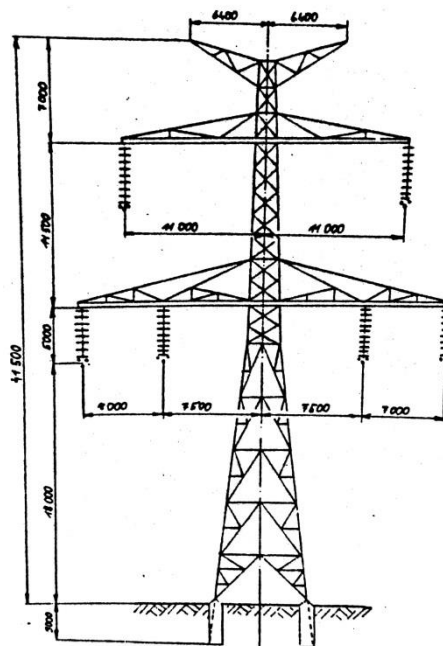
4.3.2 Zhodnocení výsledků

V situaci, kdy jsou dvě plynovodní potrubí od sebe vzdálená jeden metr, tak pozorujeme, že v potrubí "A" se magnetická indukce snížila z hodnoty 1,967 mT, což byla změřená hodnota u samostatného plynovodního potrubí a vvn vedení, na hodnotu 1,383 mT. V případě, že potrubí "B" bylo ve vzdálenosti 10 metrů, magnetická indukce v potrubí "A" se rovnala 1,627 mT, to je poloviční rozdíl oproti vzdálenosti jeden metr.

Tento jev je způsobený vzájemným stíněním obou potrubí. Ostatní zkoumané veličiny na tom byly velice podobně. Další věcí, kterou můžeme pozorovat je, že činné ztráty v situaci dvě potrubí s mezerou jeden metr v součtu klesly. Na potrubí "A" činné ztráty činí 16,71 mW a na potrubí "B" to je podobná hodnota a to 16,43 mW. V součtu činí ztráty na obou plynovodních potrubí 33,14 mW, tato hodnota je o 8,4 mW nižší než hodnota naměřená u souběhu vvn vedení a jednoho plynovodního potrubí umístěného na totožném místě s potrubím "A".

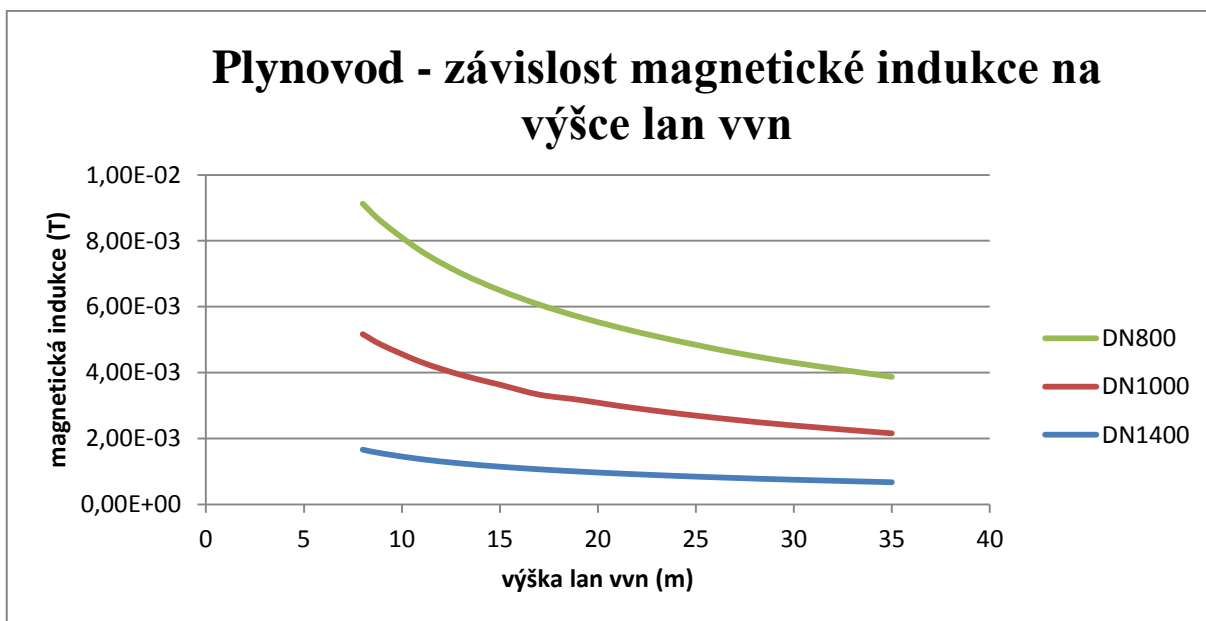
4.4 Stožár 400 kV typ "Donau" a souběžně uložený plynovod- vertikální závislost

V této části budu pozorovat vliv elektromagnetického pole stožáru typu "Donau" na souběžné plynovody DN800, DN1000 a DN1400. Stožár nese dvě paralelní vedení, která jsou tvořena trojsvazkovými vodiči $3 \times 450 \text{ mm}^2$ AlFe6. Fázové vodiče jednoho vedení jsou uspořádány tak, že nejvýše je fáze "u", vlevo dole fáze "v" a zbývající je fáze "w". Stejně vodiče jsou pořity i u stožáru typu "Kočka" v kapitole 4.1. Předpokládám, že průběhy budou podobné, avšak hodnoty naměřených veličin budou díky dvojitému vedení vyšší, než je tomu u jednoduchého vedení. Výšku vedení budu měnit od 8 metrů do 35 metrů. Potrubí umístím 1 metr hluboko a 20 metrů od osy stožáru, abych mohl porovnat výsledné výsledky se stožárem "Kočka".

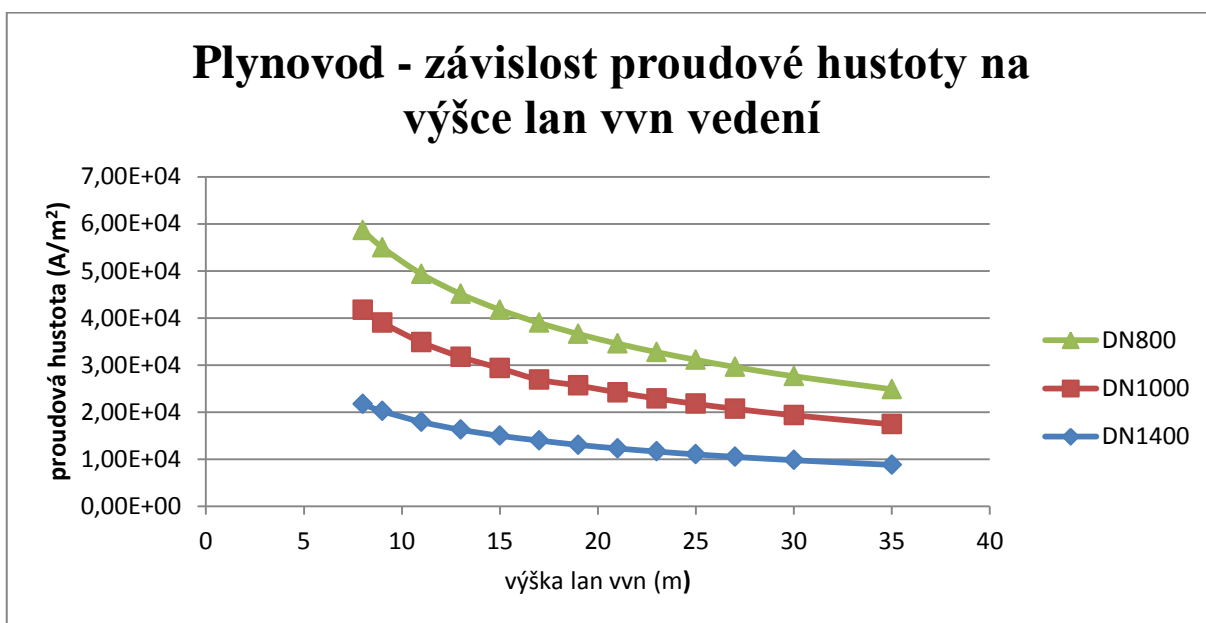


Obr. 4.17. Stožár "Donau" 400kV [1]

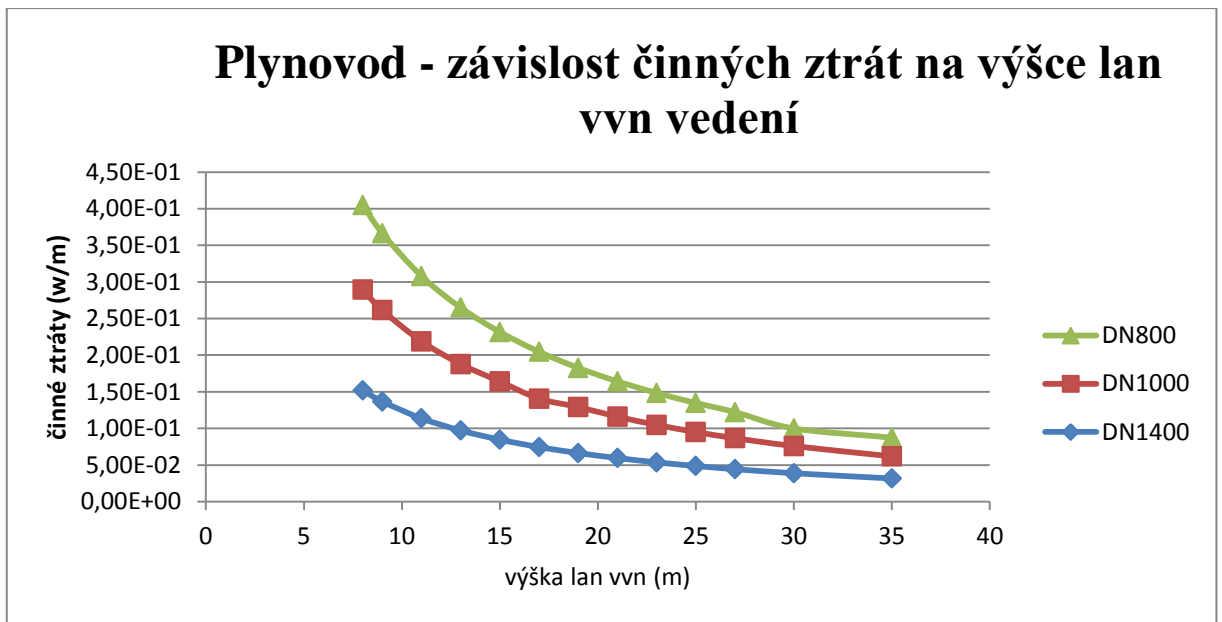
4.4.1 Výsledné grafy



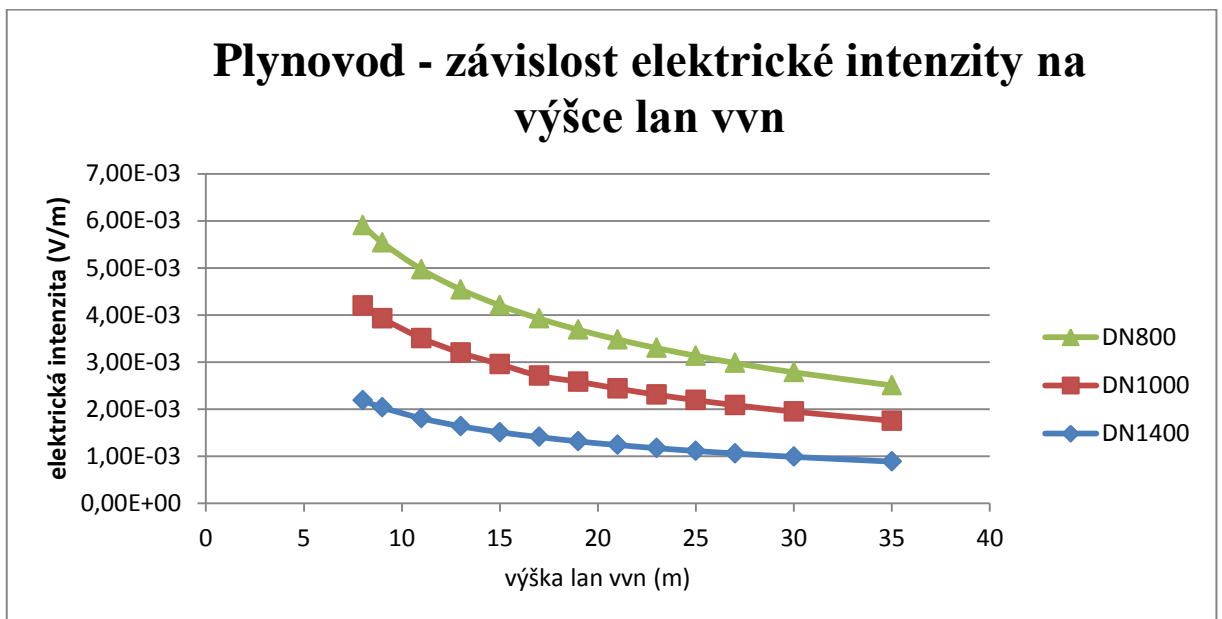
Obr. 4.18. Závislost magnetické indukce na výšce lan vedení vvn.



Obr. 4.19. Závislost proudové hustoty na výšce lan vedení vvn.



Obr. 4.20. Závislost činných ztrát na výšce lan vedení vvn.



Obr. 4.21. Závislost činných ztrát na výšce lan vedení vvn.

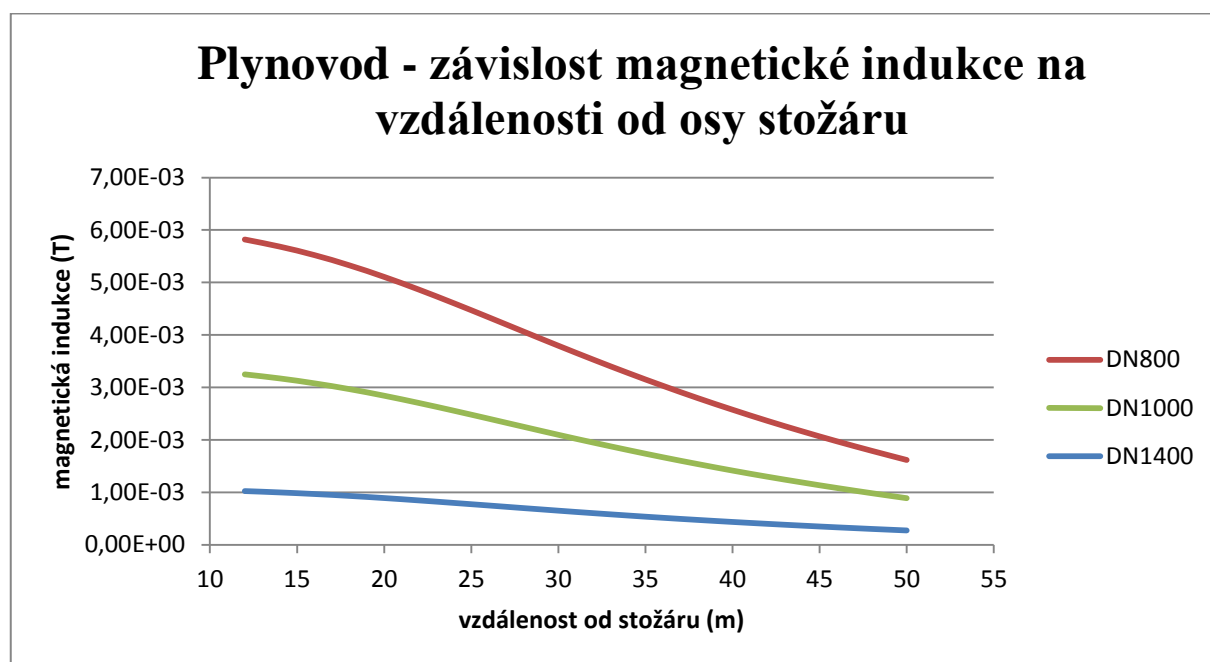
4.4.2 Zhodnocení výsledků

Z grafů je zřejmé, že hodnoty měřených veličin vzrostly oproti stožáru “Kočka“. Nejvyšší hodnoty magnetické indukce a činných ztrát se nacházeli u potrubí DN800 kde bylo naměřeno $B = 9,13 \text{ mT}$ a $P_j = 0,405 \text{ mW}$. Tyto hodnoty platí pro situaci, kdy výška lan byla 8 metrů nad zemí.

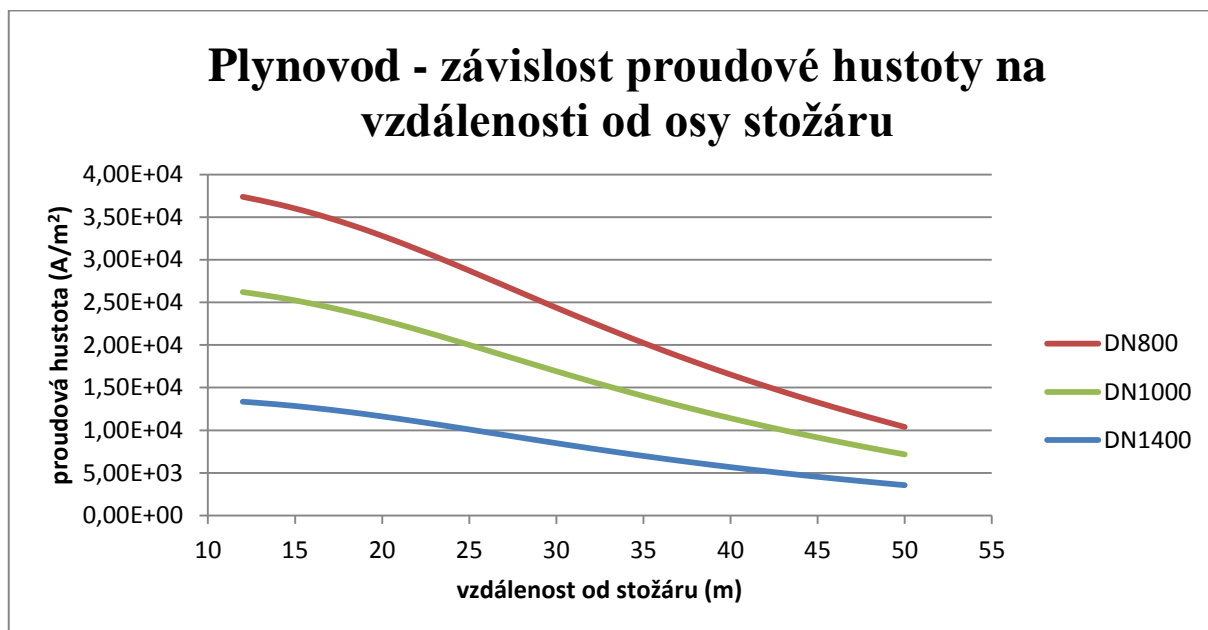
4.5 Stožár 400 kV typ “Donau “ a souběžně uložený plynovod- horizontální závislost

Nyní zjistím horizontální závislost zkoumaných veličin u stožáru typu “Donau“ a souběžně uloženého potrubí DN800, DN1000 a DN1400. Tato situace je obdobná situaci popisované v kapitole 4.2, s tím rozdílem že budu mít místo jednoduchého vedení, paralelní vedení. Všechny parametry i materiály zůstávají neměnné, abych pak vliv jednotlivých vedení mohl porovnat.

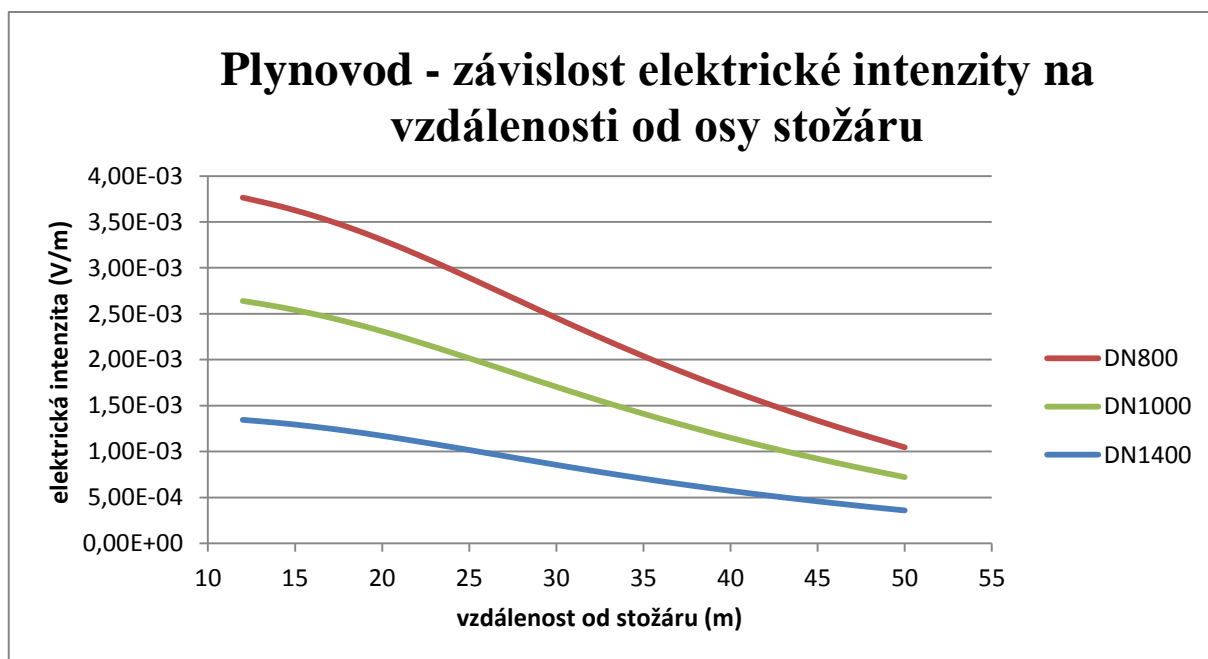
4.5.1 Získané výsledky



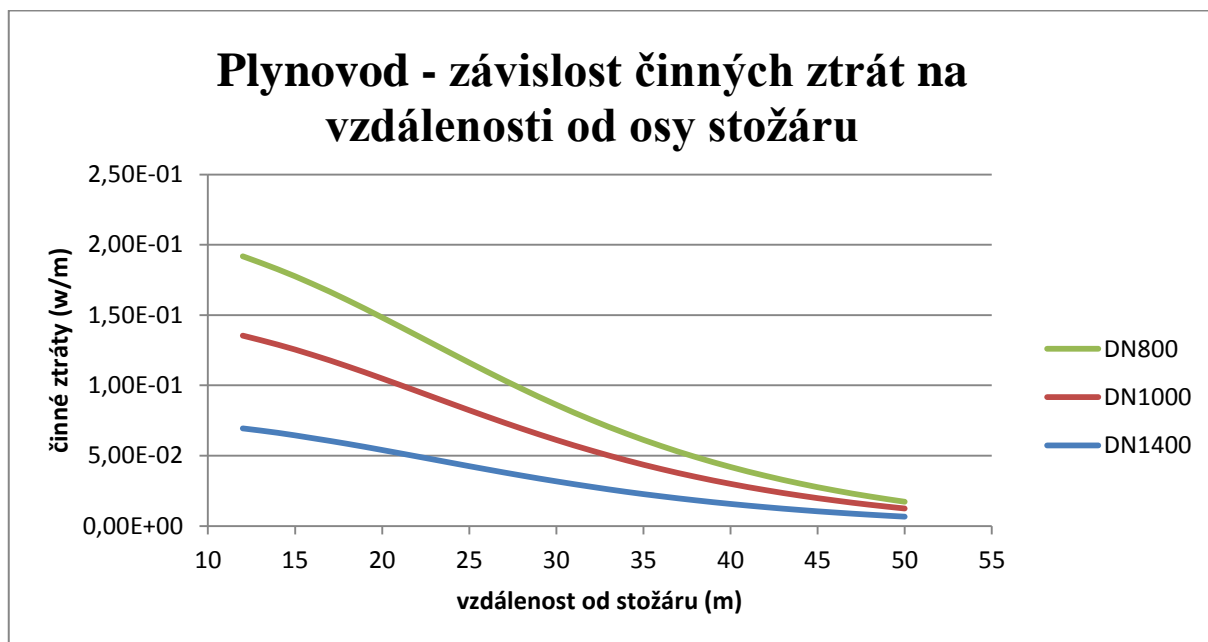
Obr. 4.22. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od osy stožáru.



Obr. 4.23. Závislost proudové hustoty na vzdálenosti od osy stožáru.



Obr. 4.24. Závislost elektrické intenzity na vzdálenosti od osy stožáru.



Obr. 4.25. Závislost činných ztrát na vzdálenost od osy stožáru.

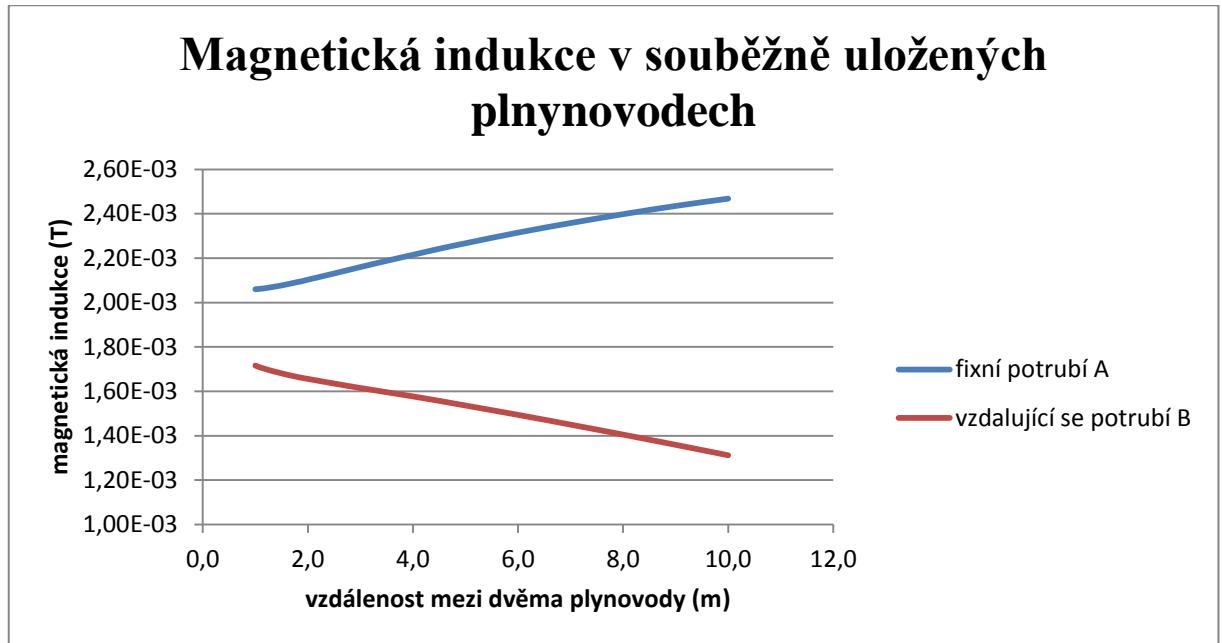
4.5.2 Zhodnocení výsledků

Předchozí grafy prozrazují nárůst všech hodnot z důvodu použití paralelního vedení a následným sčítáním jednotlivých elektromagnetických polí trojsvazkových vodičů. Nejvyšší hodnota magnetické indukce u potrubí DN800 byla naměřena ve vzdálenost 12 metrů od osy stožáru a to 5,82 mT.

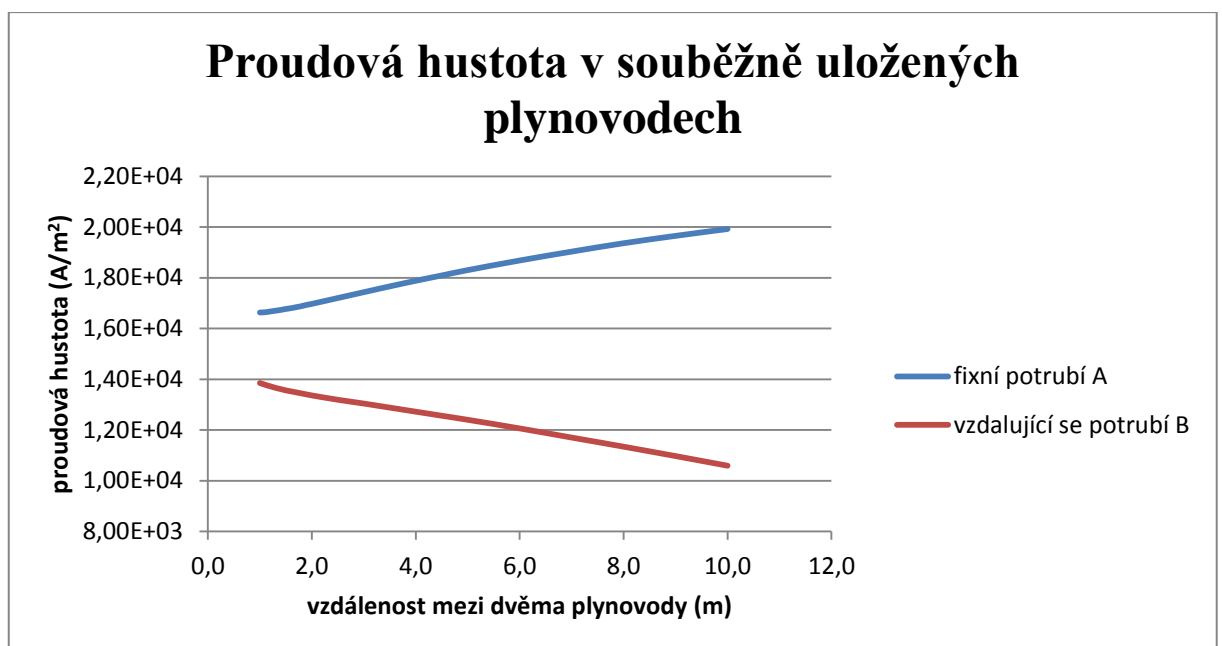
4.6 Stožár 400 kV typ "Donau" a dva souběžně uložené plynovody

Poslední variantu venkovního vedení vvn pro možnou situaci uvádím stožár 400 kV typu "Donau" s dvěma paralelními vedeními a dva souběžně uložené plynovody typu DN1000. Parametry i uložení potrubí zůstanou stejné jako v kapitole 4.3.

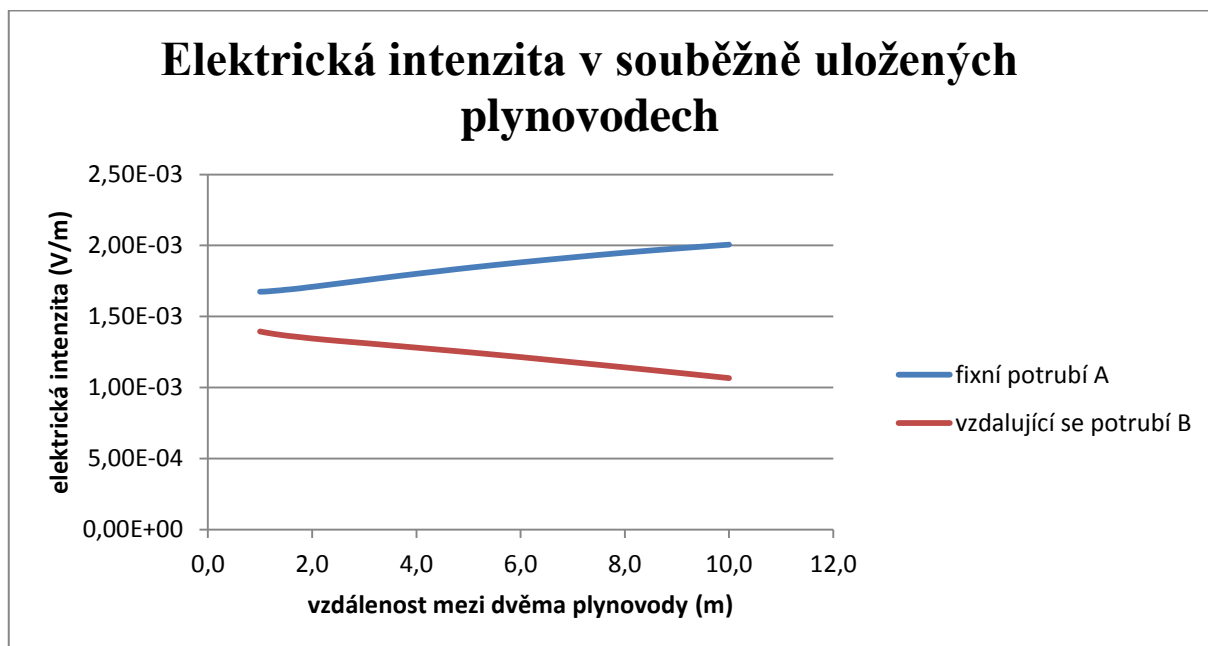
4.6.1 Získané výsledky



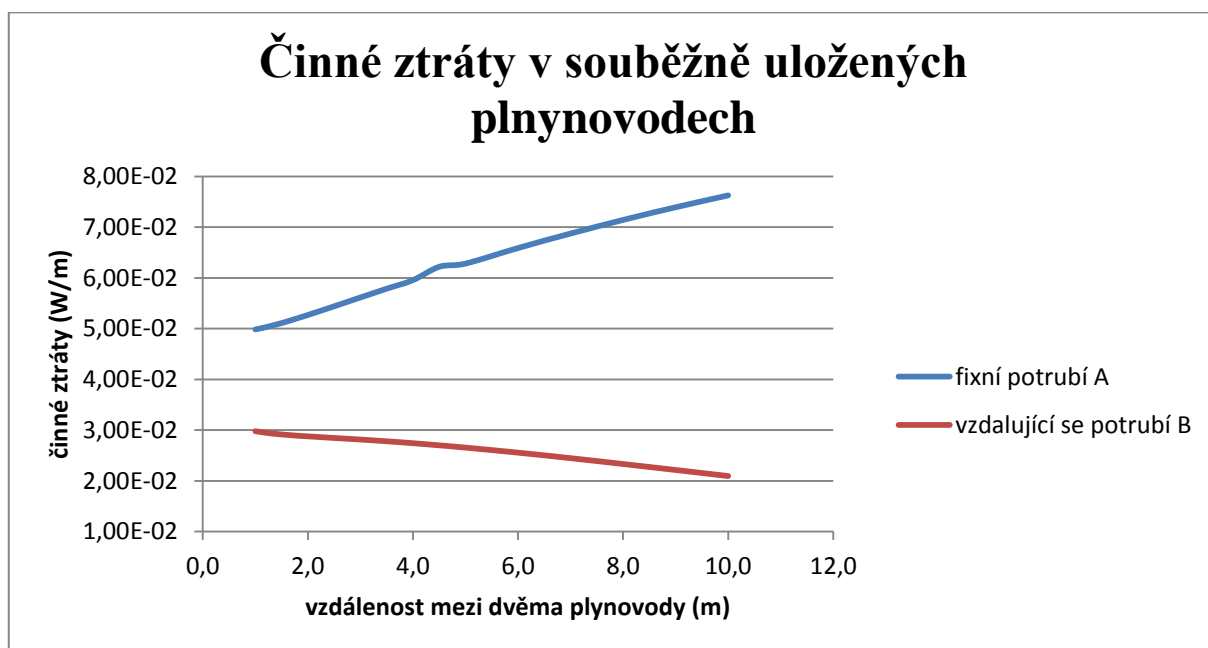
Obr. 4.26. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti dvou potrubí.



Obr. 4.27. Závislost proudové hustoty na vzdálenosti dvou potrubí.



Obr. 4.28. Závislost elektrické intenzity na vzdálenosti dvou potrubí.



Obr. 4.29. Závislost činných ztrát na vzdálenosti dvou potrubí.

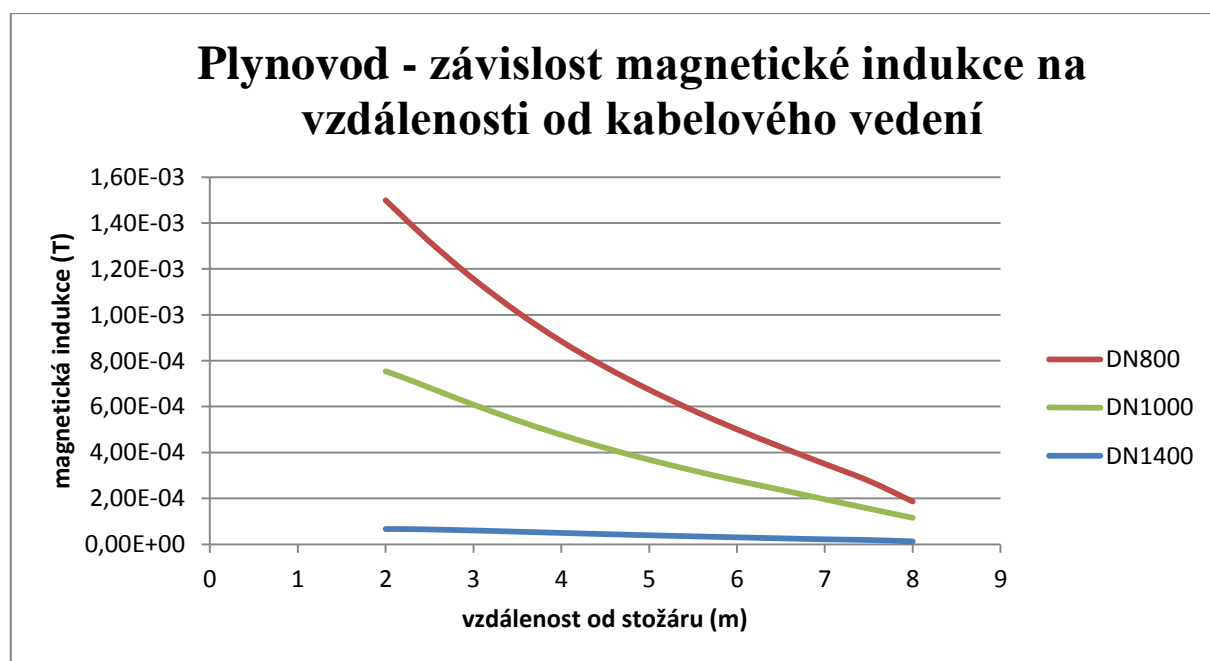
4.6.2 Zhodnocení výsledků

Průběh grafu je velmi podobný, jak to mu je v kapitole 4.3, setkáváme se s vyššími hodnotami, jak jsme předpokládali. Vyšší hodnoty jsou způsobeny paralelním vedením.

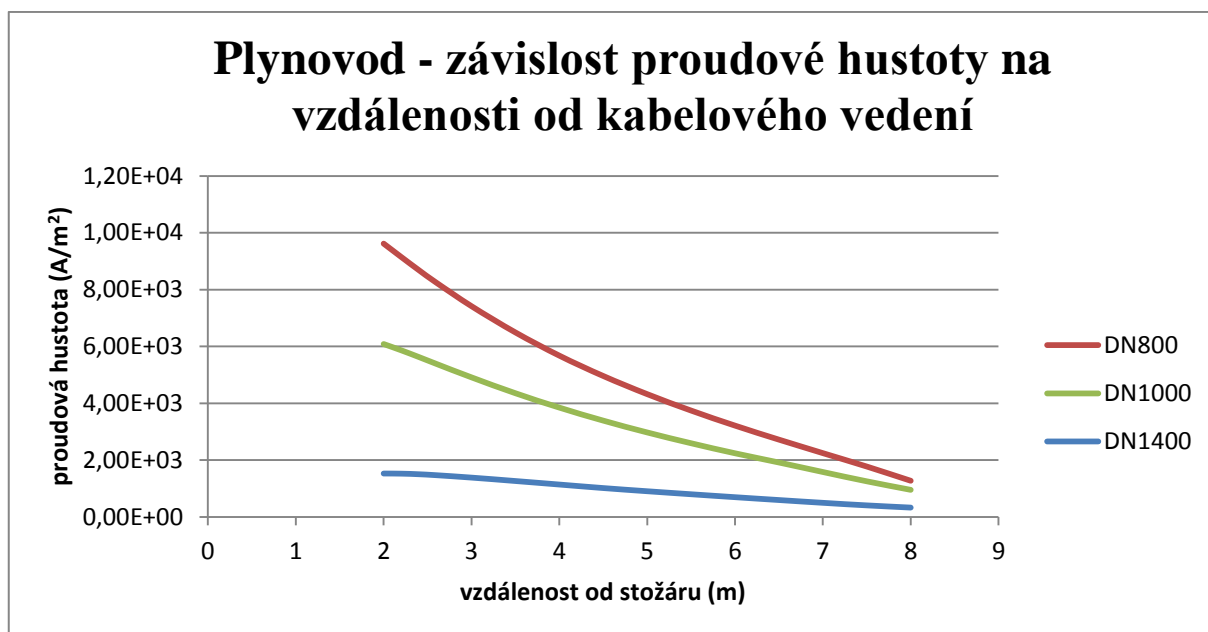
4.7 Kabelové vedení a souběžně uložený plynovod

V této části budu zjišťovat vliv kabelového vedení, o napěťové hladině 110-500 kV na souběžně uložený plynovod typu DN800, DN1000 a DN1400. Kabelové vedení s měděným jádrem uvažuji o průřezu 1600 mm^2 s maximálním protékaným proudem 1550 A dle katalogu firmy zabývající se kabelovými systémy [9]. Toto vedení jsem umístil 1.7 metrů hluboko a jednotlivé fáze jsou od sebe vzdáleny 70 cm, plynovod je umístěn 1 metr pod zemí a vzdálenost mezi postranním kabelem a plynovodem budu měnit v rozmezí dvou až osmi metrů.

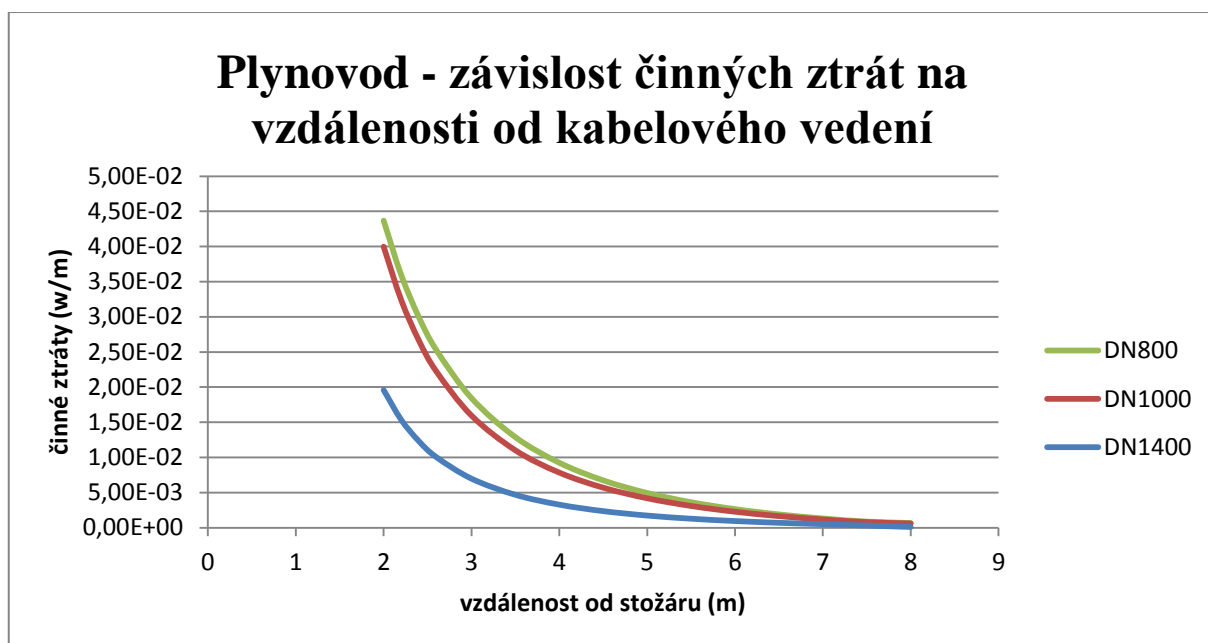
4.7.1 Získané výsledky



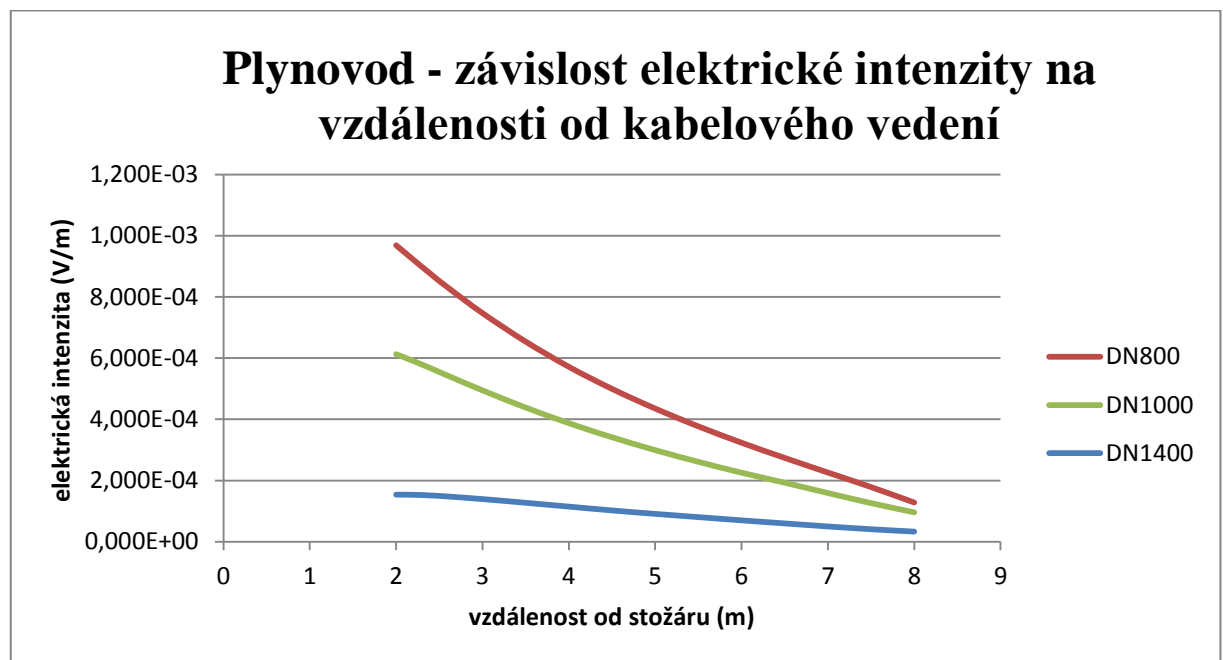
Obr. 4.30. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od kabelového vedení.



Obr. 4.31. Závislost proudové hustoty na vzdálenosti od kabelového vedení.



Obr. 4.32. Závislost činných ztrát na vzdálenosti od kabelového vedení.



Obr. 4.33. Závislost elektrické intenzity na vzdálenosti od kabelového vedení.

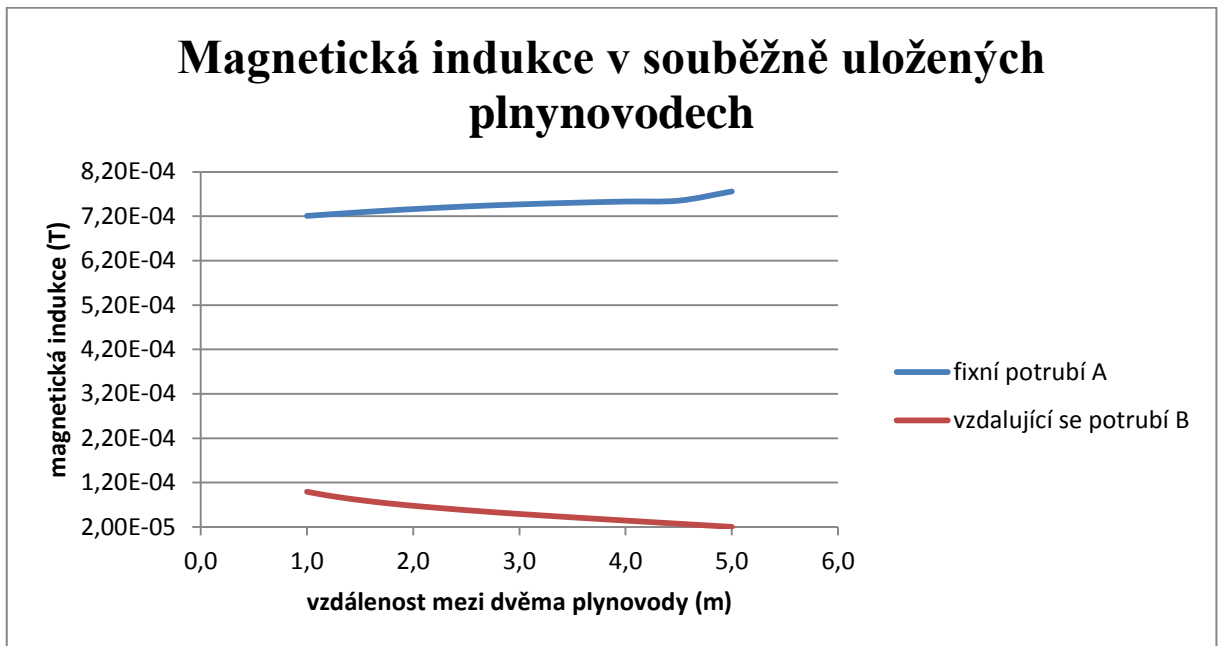
4.7.2 Zhodnocení výsledků

Magnetická indukce v potrubí umístěném ve vzdálenosti dvou metrů od kabelového vedení odpovídá hodnotám magnetické indukce v potrubí u stožáru typu “Kočka“ a “Donau“ ve vzdálenosti 50 metrů od osy stožáru, popisované v kapitole 4.1 a 4.4. Z těchto výsledků můžu usoudit, že elektromagnetický vliv kabelového vedení v porovnání s klasickým venkovním vedením je minimální. Je to způsobené měděným stíněním, které je umístěno pod vnějším pláštěm kabelu.

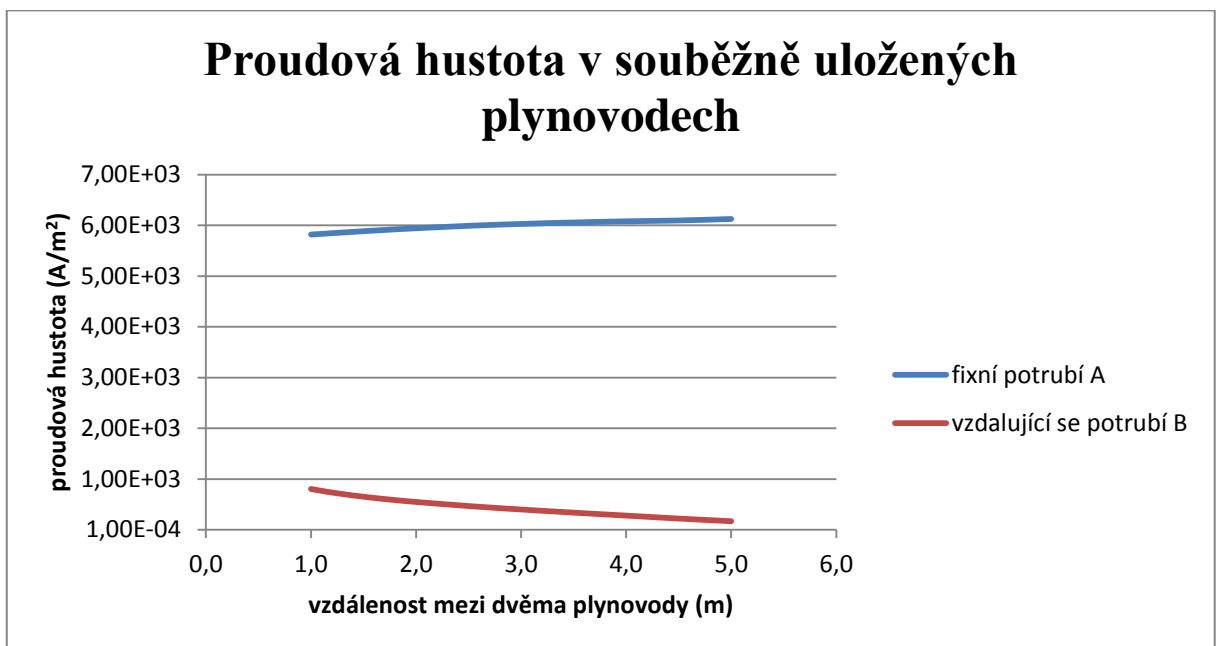
4.8 Kabelové vedení a dva souběžně uložené plynovody

V tomto případě budu pozorovat elektromagnetický vliv kabelového vedení na dva souběžně uloženými plynovody typu DN1000. Kabelové vedení bude uloženo na shodném místě, jako je u předchozí kapitoly. Fixní potrubí A jsem umístil ve vzdálenosti dvou metrů od kabelového vedení a druhé potrubí se pohybovalo ve vzdálenostech jednoho až pěti metrů.

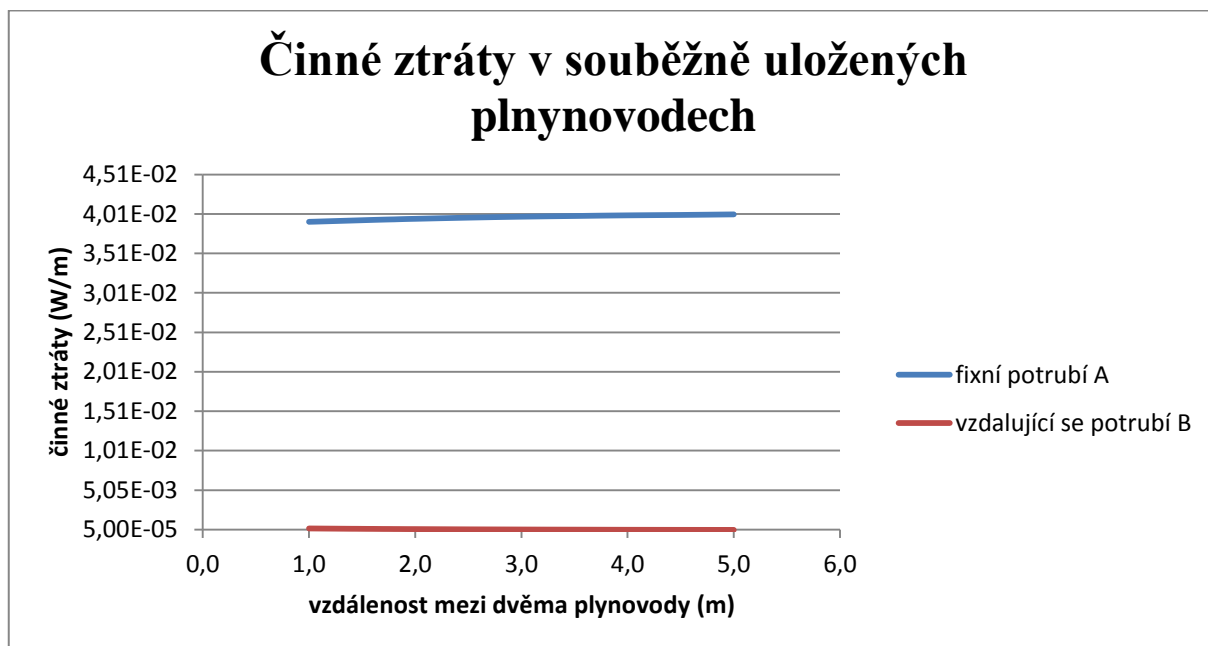
4.8.1 Získané výsledky



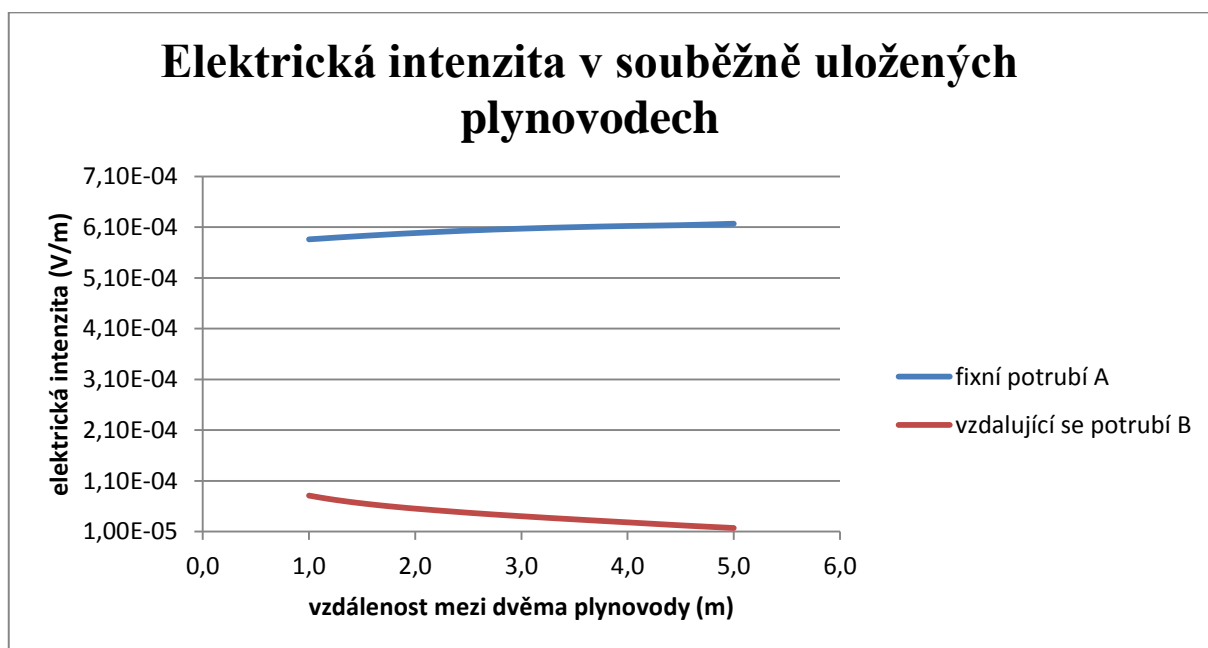
Obr. 4.34. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti dvou potrubí.



Obr. 4.35. Závislost proudové hustoty na vzdálenosti dvou potrubí.



Obrázek 4.36. Závislost činných ztrát na vzdálenosti dvou potrubí.



Obrázek 4.37. Závislost elektrické intenzity na vzdálenosti dvou potrubí.

4.8.2 Zhodnocení výsledků

Pozorované veličiny u fixního potrubí A se měnily jen nepatrně, jak lze vidět v grafech a hlavně na naměřených hodnotách které jsou přiložené v příloze. Proudová hustota v potrubí B ve vzdálenosti jednoho metru od fixního potrubí A je 800 A/m^2 což je oproti situaci, kdy je potrubí umístěné na stejném místě, ale bez fixního potrubí A, jak je popisováno v předchozí kapitole, téměř pětina velikosti proudové hustoty naměřené v kapitole 4.7. Tento jev je způsobený stíněním od fixního potrubí A.

5 Závěr

V této práci jsem se zabýval problematikou vlivu venkovních a kabelových vedení na souběžně uložená zařízení. V teoretické části jsem představil hlavní rovnice elektromagnetického pole, které slouží jako základ pro následné řešení problému. Použitým nástrojem zde byl program Agros2D, který umožnil vykreslit elektromagnetické pole v okolí elektrických a kabelových vedení. Program funguje na bázi zadaných geometrických rozměrů, materiálových konstant. Výsledkem toho poté je model vedení, ve kterém je následně možné vyčíst hodnoty na potřebných místech kdekoliv v definované oblasti. Získané hodnoty jsem promítl do grafů, které znázorňují závislost měřených veličin (magnetickou indukci, proudovou hustotu, činné ztráty a elektrickou intenzitu). Popsal jsem několik ilustrativních příkladů s různým geometrickým uspořádáním přenosových koridorů, u kterého jsem pozoroval vliv elektromagnetického pole při různé poloze plynovodu vůči vedení. Podle stejného algoritmu mohu vyřešit jakékoli uspořádání vedení a produktovodů.

Hlavním negativem, které se během tvorby práce objevilo, byl samotný program Agros2D. Jelikož při řešení složitějších úkonů, při kterých byl počítač vystaven velkému zatížení, došlo k tomu, že program způsobil přetížení procesoru, či při každé změně geometrického uspořádání se musela pokaždé daná úloha uložit a program restartovat. Jinak docházelo k zamrznutí a následnému spadnutí celého programu. Získávání hodnot tedy bylo tím pádem velmi časově náročné.

Cílem této práce bylo primárně zjistit vliv venkovního a kabelového vedení na souběžně uložená zařízení. Z mého pohledu se cíl práce podařilo naplnit.

Z výsledků práce je patrné, že hodnoty jsou rozdílné u každého typu a geometrického uspořádání vedení. Nejmenší vliv na uložené plynovodní potrubí mělo kabelové vedení uvedené v kapitolách 4.7 a 4.8, u kterého naměřená hodnota činných ztrát, potrubí DN800 ve vzdálenosti dvou metrů, dosahovala 43,7 mW a magnetické indukce 1,5 mT. Tyto hodnoty jsou oproti hodnotám naměřených u stožáru typu "Donau" s dvěma paralelními vedeními, relativně malé, přibližně desetkrát menší. Jelikož v přímé vzdálenosti spodní trojsvazkové vodiče a plynovodního potrubí DN800, která je cca 9 metrů, dosahuje magnetická indukce 9,13 mT a činné ztráty hodnoty 405 mW. Hodnoty u stožáru "Kočka" na tom byly podobně jako u stožáru "Donau", ale dosahovaly menších hodnot, jelikož stožár nese jen jedno vedení. V blízké vzdálenosti to byl rozdíl cca. 50 %, avšak ve vzdálenostech okolo 40 metrů byl rozdíl menší přibližně 20 %. V případě souběhu dvou plynovodů DN1000 výsledky prozrazovaly, že na potrubí umístěné dál od vedení působí 10krát menší elektromagneticky

vliv, než když je uloženo ve stejné vzdálenosti jen jedno potrubí. Toto je způsobeno potrubím umístěným blíže k vedení, které fungovalo jako stínění.

6 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MERTLOVÁ, Jiřina. *Elektrické stanice a vedení*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-7082-155-8.
- [2] PROCHÁZKA, R. Stožáry vvn I. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4170-stozary-vvn-i> (4.4.2016)
- [3] PROCHÁZKA, R. Venkovní vedení vvn I. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4142-venkovni-vedeni-vvn-i> (4.4.2016)
- [4] PROCHÁZKA, R. Stožáry vvn II. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4183-stozary-vvn-ii> (4.4.2016)
- [5] ČERMÁK, J. Vodiče venkovních elektrických vedení. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/vodice-venkovnich-elektrickyh-vedeni/>
- [6] KARBAN, P. Aplikace pro řešení fyzikálních polí. Dostupné z: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli> - !/ - 1/ (15.4.2016)
- [7] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [8] NET4GAS, Dostupné z: <http://www.net4gas.cz/cs/media/tiskove-zpravy/N4G-40-NGTA-brozura-web.pdf> (20.4.2016)
- [9] ABB, Podzemní kabely. Dostupné z: <http://www.abb.cz/product/db0003db002618/c1257399005c5f4fc125741000243f38.aspx> (1.5.2015)