

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vyšetření elektrického a magnetického pole v okolí
venkovních vedení

Autor práce: Tomáš Nazarčík

Vedoucí práce: Prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc.

Plzeň 2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš NAZARČÍK**
Osobní číslo: **E09B0069P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Vyšetření elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení**
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. Úvod (typy stožárů pro vn a vvn, hygienické normy).
2. Metoda výpočtu pro stanovení rozložení intenzity elektrického pole.
3. Metoda pro stanovení rozložení intenzity magnetického pole.
4. Výpočty pro konkrétní uspořádání, variantní výpočty pomocí profesionálního programu.
5. Zhodnocení a doporučení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

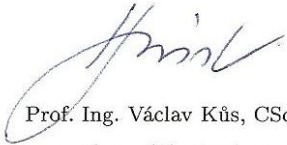
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc.**
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

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na vyšetření elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení. V práci jsou uvedeny nejpoužívanější typy stožárů venkovních vedení včetně hygienických norem. Na základě popsaného postupu je proveden analytický výpočet intenzity elektrického a magnetického pole. Jeho výsledky jsou porovnány s numerickým výpočtem.

Klíčová slova

stožár venkovního vedení, svazkový vodič, zemnicí lano, hygienické normy, výpočet intenzity elektrického pole, výpočet intenzity magnetického pole, konfigurace fází

Abstract

Nazarčík, Tomáš. *Analysis of electric and magnetic field in vicinity of overhead transmission lines.*

The Bachelor's thesis is focused on analysis of electric and magnetic field in the vicinity of overhead transmission lines. In the thesis there are introduced the most used types of transmission towers including the safety standards. According to the described method the calculation of electric and magnetic field strength is carried out. These results are compared with numerical type of calculation.

Key words

transmission tower, bundle conductors, ground wire, safety standards, calculation of electric field strength, calculation of magnetic field strength, phase arrangement

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 24. května 2012

Tomáš Nazarčík

.....
Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Zdeňce Benešové, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

1. Úvod	1
2. Stožáry venkovních vedení.....	2
2.1. Napěťové hladiny.....	2
2.2. Užití svazkových vodičů a zemnicích lan.....	2
2.3. Typy stožárů vvn a vn.....	4
2.3.1. Tvar stožárové konstrukce Donau	4
2.3.2. Tvar stožárové konstrukce Dvojitý Portál	5
2.3.3. Tvar stožárové konstrukce Soudek.....	6
2.3.4. Tvar stožárové konstrukce Kočka	7
3. Hygienické normy a předpisy	8
4. Metoda vyšetření elektrického pole.....	11
4.1. Metoda zrcadlení.....	11
4.2. Výpočet nábojů	12
4.3. Výpočet intenzity elektrického pole	15
5. Metoda vyšetření magnetického pole	16
6. Výpočet rozložení intenzity elektrického a magnetického pole stožárů Donau, Dvojitý Portál a Soudek.....	18
6.1. Výpočet intenzity elektrického pole základní výšky	20
6.2. Výpočet intenzity magnetického pole základní výšky.....	23
6.3. Výpočet intenzity elektrického pole minimální výšky	26
6.4. Výpočet intenzity magnetického pole minimální výšky.....	29
7. Numerický výpočet elektrického a magnetického pole programem QuickField	32
7.1. Modelování magnetického pole.....	32
7.2. Modelování elektrického pole	35
8. Závěr.....	40
Použitá litereratura.....	42
Přílohy	43

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Kotevní stožár Donau 1995 R	4
Obr. 2.2 Kotevní stožár Dvojitý Portál I+2	5
Obr. 2.3 Kotevní stožár Soudek 2x110 kV	6
Obr. 2.4 Kotevní stožár Soudek 2x220 kV	6
Obr. 2.5 Zesílený nosný stožár Kočka 1977 Ns	7
Obr. 4.1 Metoda zrcadlení	11
Obr. 4.2 Vyjádření potenciálových koeficientů	12
Obr. 4.3 Konfigurace vodičů dvojitých nadzemních vedení se zemnicími lany	13
Obr. 5.1 Rozložení intenzity magnetického pole do složek	16
Obr. 6.1 Graf elektrické intenzity stožáru Donau základní výšky	20
Obr. 6.2 Graf elektrické intenzity stožáru Dvojitý Portál základní výšky	21
Obr. 6.3 Graf elektrické intenzity stožáru Soudek základní výšky	22
Obr. 6.4 Graf intenzity magnetického pole stožáru Donau základní výšky	23
Obr. 6.5 Graf intenzity magnetického pole stožáru Dvojitý Portál základní výšky	24
Obr. 6.6 Graf intenzity magnetického pole stožáru Soudek základní výšky	25
Obr. 6.7 Graf elektrické intenzity stožáru Donau minimální výšky	26
Obr. 6.8 Graf elektrické intenzity stožáru Dvojitý Portál minimální výšky	27
Obr. 6.9 Graf elektrické intenzity stožáru Soudek minimální výšky	28
Obr. 6.10 Graf intenzity magnetického pole stožáru Donau minimální výšky	29
Obr. 6.11 Graf intenzity magnetického pole stožáru Dvojitý Portál minimální výšky	30
Obr. 6.12 Graf intenzity magnetického pole stožáru Soudek minimální výšky	31
Obr. 7.1 Volba vzdálenosti spodní hranice oblasti od vodičů	32
Obr. 7.2 Graf intenzity magnetického pole stožáru Donau získaný numerickým a analytickým výpočtem	33
Obr. 7.3 Graf intenzity magnetického pole stožáru Dvojitý Portál získaný numerickým a analytickým výpočtem	34
Obr. 7.4 Graf intenzity magnetického pole stožáru Soudek získaný numerickým a analytickým výpočtem	34
Obr. 7.5 Vybrané časové okamžiky	35
Obr. 7.6 Graf elektrické intenzity stožáru Donau vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky	36

Obr. 7.7 Graf elektrické intenzity stožáru Donau vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky	36
Obr. 7.8 Graf elektrické intenzity stožáru Dvojitý Portál vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky	37
Obr. 7.9 Graf elektrické intenzity stožáru Dvojitý Portál vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky	37
Obr. 7.10 Graf elektrické intenzity stožáru Soudek vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky	38
Obr. 7.11 Graf elektrické intenzity stožáru Soudek vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky	38

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Základní elektrické vzdálenosti	8
Tab. 3.2 Nejkratší vnější vzdálenosti	9
Tab. 6.1 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Donau	20
Tab. 6.2 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Dvojité Portál.....	21
Tab. 6.3 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Soudek	22
Tab. 6.4 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Donau	23
Tab. 6.5 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Dvojité Portál	24
Tab. 6.6 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Soudek	25
Tab. 6.7 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Donau	26
Tab. 6.8 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Dvojité Portál.....	27
Tab. 6.9 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Soudek	28
Tab. 6.10 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Donau	29
Tab. 6.11 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Dvojité Portál	30
Tab. 6.12 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Soudek.....	31

Seznam použitých zkratk a symbolů

UCTE	Union for the Coordination of the Transmission of Electricity	
D_{el}	základní elektrická vzdálenost	[m]
U_s	největší napětí sítě	[kV]
E	fázor intenzity elektrického pole	[Vm ⁻¹]
Q	elektrický náboj	[C]
φ	skalární elektrický potenciál	[V]
ℓ	délka vodiče	[m]
ε	permitivita prostředí	[Fm ⁻¹]
A	matice potenciálových koeficientů	
B	inverzní matice A	
n	počet vodičů	
R	vlastní poloměr vodiče	[m]
d	vzdálenost mezi dvěma vodiči	[m]
b	vzdálenost mezi vodičem a obrazem 2. vodiče	[m]
a	operátor fázového posunutí o 120°	
p	vektor určující pořadí fází	
P	matice vektorů p	
α_{ii}	vlastní potenciálový koeficient	[VC ⁻¹]
α_{ij}	vzájemný potenciálový koeficient	[VC ⁻¹]
β_{ii}	koeficient elektrostatické kapacity vodiče na jednotku délky	[Fm ⁻¹]
β_{ij}	koeficient elektrostatické indukce vodiče i na vodič j	[Fm ⁻¹]
δ	fázový posuv mezi napětími a proudy obou obvodů	[rad]
H	fázor intenzity magnetického pole	[Am ⁻¹]
B	magnetická indukce	[T]
ES	elektrizační soustava	
U	amplituda napětí fáze vůči zemi	[V]
I	fázor amplitudy proudu	[A]
A	vektorový magnetický potenciál	[Wbm ⁻¹]
Γ	hranice oblasti	

1. Úvod

Celkový rozvoj společnosti a hospodářství je poměrně úzce spojen s přenosovými možnostmi venkovních vedení. Ty mají za úkol transportovat elektrickou energii z výroben až ke spotřebitelům. S ohledem na zvětšující se hodnoty výkonu přenášeného vedeními je nutná výstavba nových linek, aby byla bezpečně zajištěna spolehlivost dodávky elektrické energie. Tento fakt je dán jednak rostoucí spotřebou elektrické energie, tak i transportem výkonu v rámci propojení přenosových soustav v rámci UCTE v Evropě. Významnou roli hraje též skutečnost, že v posledních letech došlo k rozšíření obnovitelných zdrojů energie, zejména fotovoltaických a větrných elektráren. Výroba z těchto zdrojů je obtížně předvídatelná, což klade ještě vyšší nároky na přenos energie.

Stavba nových venkovních vedení je časově náročná záležitost, jež vyžaduje důkladný rozbor všech aspektů. Vždy je zapotřebí řešit kompromis mezi ochranou přírody a krajiny a nejvhodnějším řešením z hlediska ekonomického i technického. Jednou z mnoha záležitostí, kterou je třeba se také zabývat, je dodržování hygienických norem. Podél celých tras vedení není možné zamezit přístupu osob. Dodržování limitů veličin elektrického a magnetického pole je důležité zejména pro osoby, které provádějí práce v okolí venkovních vedení a tráví tak v této oblasti delší časový úsek.

Cílem této bakalářské práce je provést výpočet elektrického a magnetického pole v okolí stožárů venkovních vedení. Z těchto výsledků ověřit, zdali nedochází k překročení limitů daných veličin, které jsou stanovené normami. Dále pak na základě výsledků určit, která rozmístění fází vykazují nejvhodnější a nejnepříznivější rozložení elektrického a magnetického pole. Podle těchto informací stanovit, který ze stožárů je nejvhodnější pro přenos elektrické energie s ohledem na rozložení elektrického a magnetického pole.

2. Stožáry venkovních vedení

2.1. Napěťové hladiny

Typy užívaných stožárů venkovních vedení závisí na napěťové hladině, na které dochází k přenosu elektrické energie. Pro přenosovou soustavu v České republice se jedná o napěťové úrovně zvláště vysokého napětí a velmi vysokého napětí. Přenosová soustava je provozována zejména na dvou napěťových hladinách - 400 kV a 220 kV. Tento fakt je dán historickým vývojem naší elektrizační soustavy. Pouze v omezené míře se v přenosové soustavě užívá napěťová hladina 110 kV. Přenosovou soustavu provozuje v naší republice společnost ČEPS, a.s.

Distribuční soustava je u nás provozována na hladinách velmi vysokého, vysokého a nízkého napětí. Hladina 110 kV je základní. Distribuční síť na hladině vn pracuje zejména na 22 kV, případně 35 kV, záleží na poloze území a rozsahu odběru. Méně často se užívá napěťových hladin 1 kV, 3 kV a 6 kV. Nízké napětí je v distribuční síti zastoupeno hodnotou 0,4 kV. Síť 110 kV a 0,4 kV se liší od 22 kV (35 kV) s ohledem na provoz uzlu sítě. Síť 110 kV a 0,4 kV se stejně jako celá přenosová soustava provozují s přímo uzemněným uzlem. Síť 22 kV (35 kV) venkovního vedení se provozují zpravidla neúčinně uzemněné přes laditelnou tlumivku. Chod distribuční soustavy zajišťují společnosti ČEZ distribuce, a.s., E-ON distribuce, a.s. a Pražská energetika, a.s. [4, str.5].

2.2. Užití svazkových vodičů a zemnicích lan

Pro přenos elektrické energie je možné užít svazkových vodičů – více vodičů (lan) na jednu fázi. Ty se až na výjimky používají výhradně pro vedení zvn, tedy na napěťové hladině 400 kV. V tomto případě jsou použita tři lana uspořádaná do rovnostranného trojúhelníku. Jejich vzdálenost, nazývaná též někdy krok, bývá zpravidla 40 cm. Pouze u jednoho případu vedení 220 kV je svazkový vodič tvořen dvěma lany s horizontálním uspořádáním. Ve zbylých případech se používají jednoduché vodiče, to znamená jeden vodič na fázi.

Svazkový vodič se u zvn a vvn vedení používá k potlačení ztrát korónou. Svazkový vodič má vliv na rozložení elektrického a magnetického pole v jeho těsné blízkosti. Jeho vliv na rozložení elektrického a magnetického pole v místech, kde je elektrické a magnetické

pole vyšetřováno, je zanedbatelný. Z tohoto důvodu je svazkový vodič ve výpočtech nahrazen v místě svého geometrického středu samostatným vodičem, kterým prochází fázový proud dané fáze.

Pro provoz venkovních vedení se používá zemnicí lano. To je zavěšeno nad fázovými vodiči. Zemnicí lano zajišťuje určitý stupeň ochrany před atmosférickým přepětím - úderem blesku. Jsou-li fázové vodiče umístěny v oblasti ochranného úhlu, je velká pravděpodobnost, že případný blesk udeří do zemnicího lana namísto do fázových vodičů. Zpravidla na všech podpěrných bodech (stožárech) je zemnicí lano spojeno se zemí. Velikost impedance zemnicí cesty musí být dostatečně nízká, aby se omezila možnost vzniku zpětného přeskočků.

Je-li vedení provozováno se zemnicím lanem, uplatní se při jeho provozu induktivní a kapacitní vazby mezi fázovými vodiči a zemnicím lanem. V důsledku geometrické nesymetrie na netransponovaném vedení může být vlivem induktivních vazeb zemnicí lano protékáno naindukovaným proudem. Ve všech výpočtech je ovšem uvažováno, že proud zemnicím lanem je nulový. Kapacitní vazby mají vliv na rozložení nábojů na jednotlivých vodičích. Při výpočtech byl tento jev respektován.

2.3. Typy stožárů vvn a vn

V této kapitole jsou popsány nejpoužívanější typy stožárů venkovních vedení [8]. Jednotlivé stožáry se navzájem liší rozmístěním fázových vodičů a zemnicích lan a také výškou vodičů nad terénem. Tyto faktory mají významný vliv na rozložení elektrického a magnetického pole. V závislosti na napěťové hladině se liší také přenášený výkon, se kterým souvisí rozdílná velikost proudů tekoucích fázovými vodiči u jednotlivých stožárů.

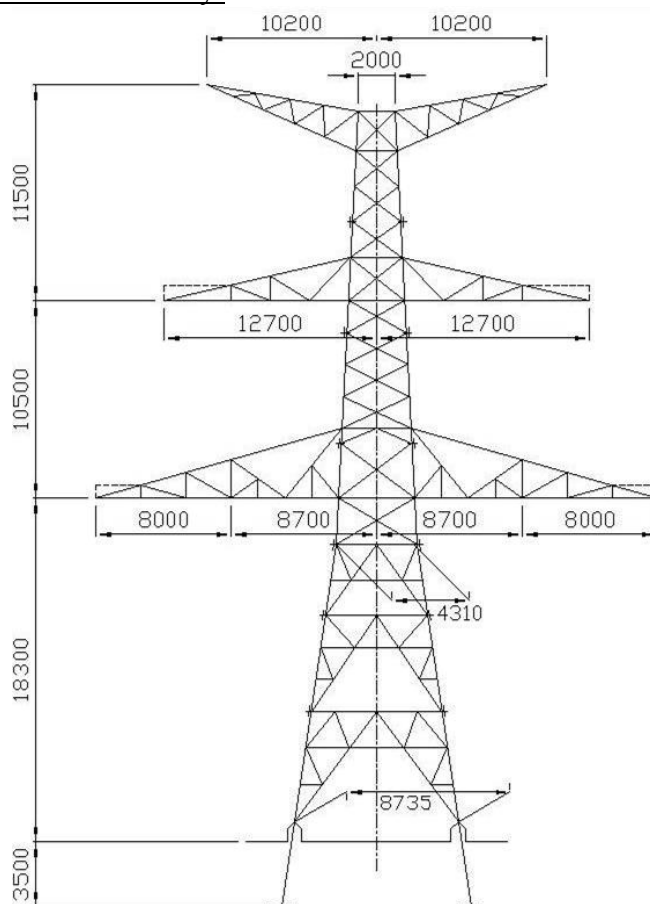
2.3.1. Tvar stožárové konstrukce Donau

Základní popis:

Konstrukce stožárů se skládá z dříku, na jehož vrcholu jsou upevněny dvě konzoly pro zemnicí lana. Hlavu stožáru s uspořádáním vodičů do rovnoramenného trojúhelníku tvoří horní a dolní konzoly. Z hlediska vyzbrojení lany jsou tyto stožáry určeny pro 2 x 3 x 3 sdružené fázové vodiče uspořádané ve dvou horizontálních rovinách.

U kotevních stožárů Donau je základní výška spodního pasu konzol 18,3 m.

Tvar a hlavní geometrické rozměry:



Obr. 2.1 Kotevní stožár Donau 1995 R

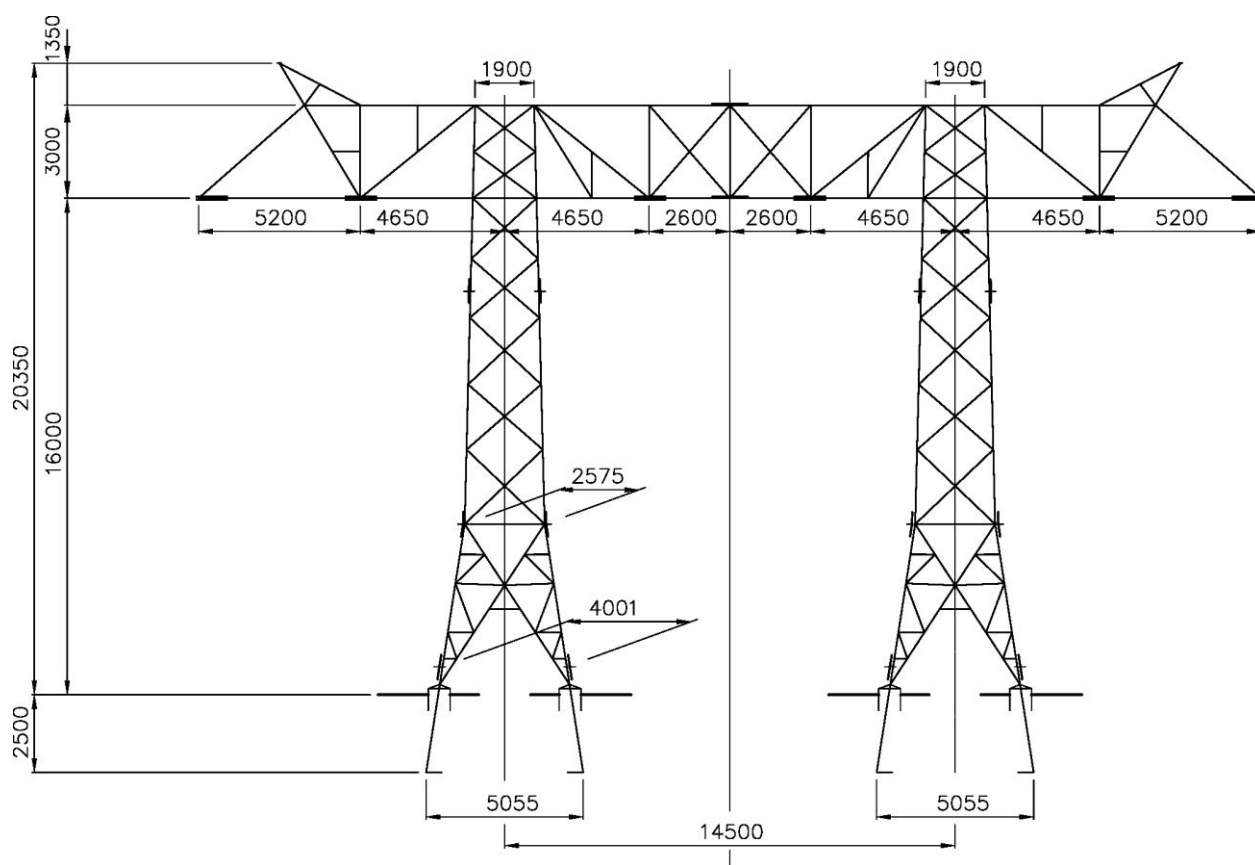
2.3.2. Tvar stožárové konstrukce Dvojitý Portál

Základní popis:

Konstrukce stožáru se skládá ze dvou dříků spojených mostem. Dříky jsou u nosných stožárů čtvercového průřezu, u kotevnicích stožárů mají rozkročený díl nad základem. Jednotlivé prvky jsou sešroubovány nebo svařeny, díly jsou spojeny šrouby.

U kotevního stožáru Dvojitý Portál je základní výška vodičů 16 m nad zemí.

Tvar a hlavní geometrické rozměry:



Obr. 2.2 Kotevní stožár Dvojitý Portál I+2

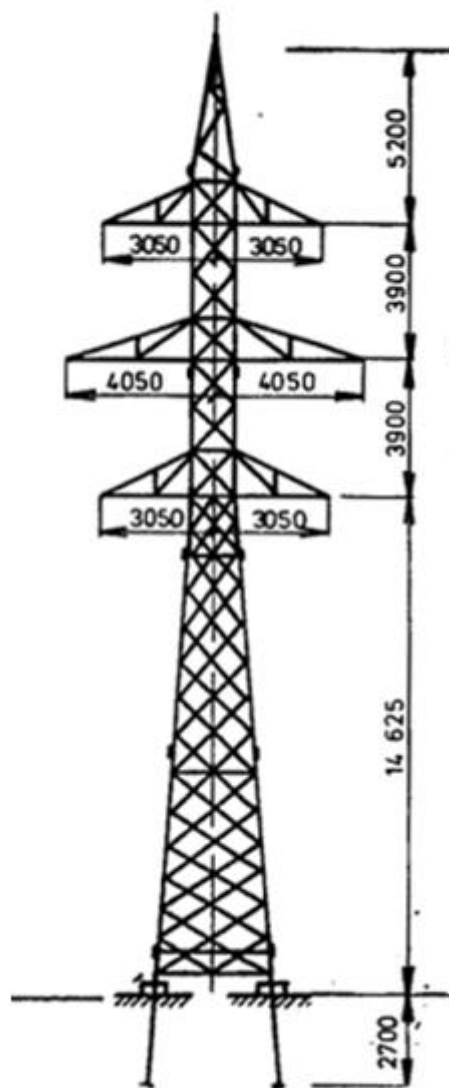
2.3.3. Tvar stožárové konstrukce Soudek

Základní popis:

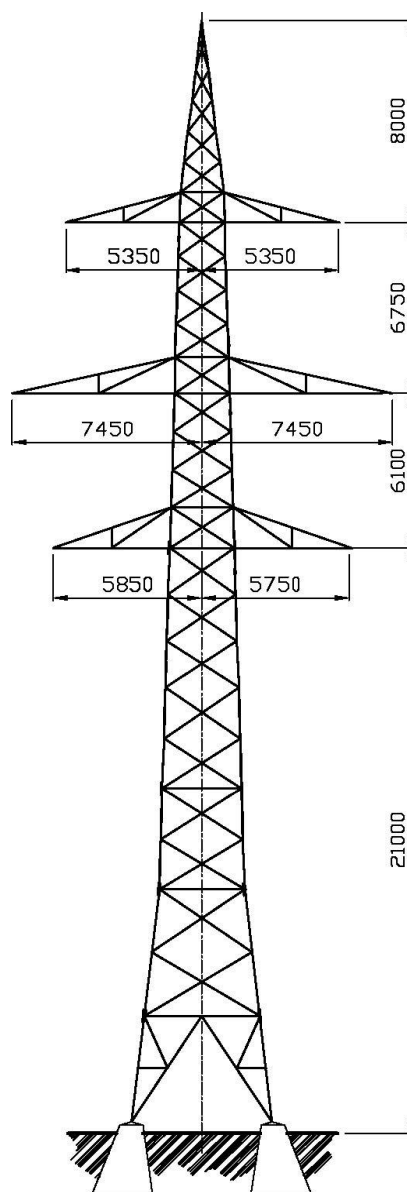
Jedná se o jednodřívové prostorové příhradové samonosné konstrukce. Jednotlivé prvky dílů stožáru jsou sešroubované. Nosné stožáry jsou úzké, kotevní stožáry mají díl nad základem rozkročený. Jednotlivé fázové vodiče jsou umístěny na nosných konzolách.

U kotevního stožáru Soudek 110 kV je základní výška spodního pasu konzol 14,625 m.

Tvar a hlavní geometrické rozměry:



Obr. 2.3 Kotevní stožár Soudek 2x110 kV



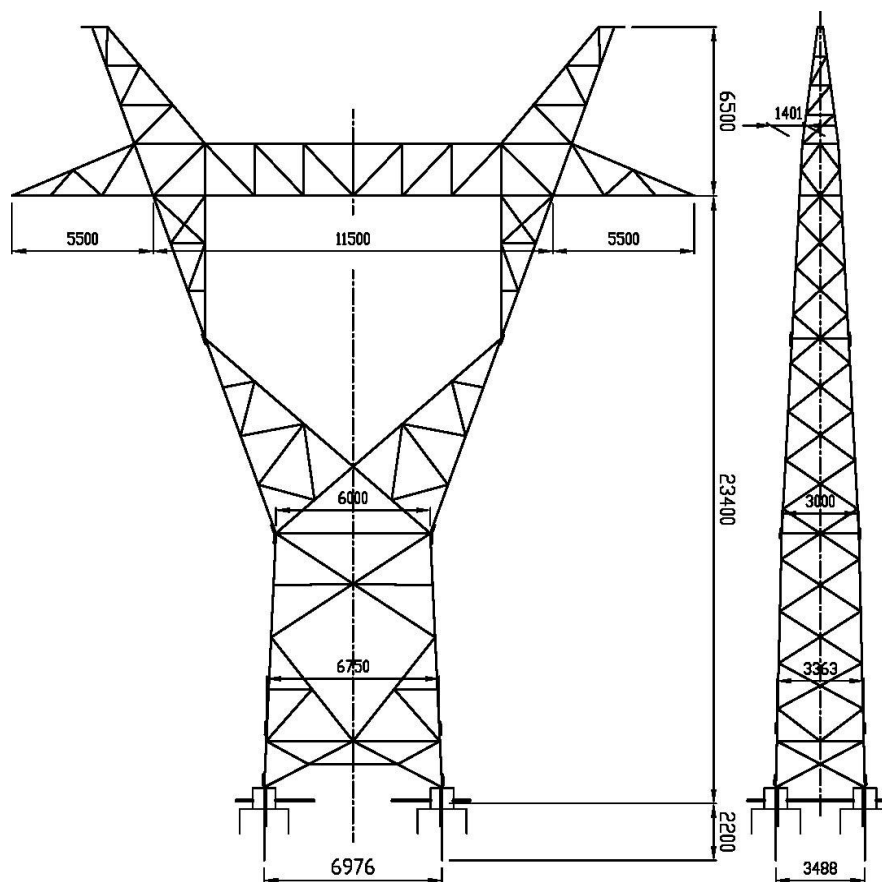
Obr. 2.4 Kotevní stožár Soudek 2x220 kV

2.3.4. Tvar stožárové konstrukce Kočka

Základní popis:

Jednodřívková konstrukce stožáru se skládá ze dvou držáků pro zemnicí lano, dvou konzol a mostu s horizontálním uspořádáním svazkových vodičů, z rozvětvené části, dílů nad základy a patek. Tyto stožáry jsou určeny pro 1 x 3 x 3 sdužené fázové vodiče uspořádané v horizontální rovině a pro dvě zemnicí lana.

Tvar a hlavní geometrické rozměry:



Obr. 2.5 Zesílený nosný stožár Kočka 1977 Ns

V dnešní době se nová vedení staví téměř výhradně dvojítá. Důvodem je úspora prostoru a finančních prostředků. Ostatní stožáry jednoduchých vedení jsou uvedeny v příloze B. Nejpoužívanější typy umístění fázových vodičů na stožárech vn jsou pak uvedeny v příloze A.

3. Hygienické normy a předpisy

Pro popis hygienických norem týkajících se venkovních vedení jsem použil normy [5][6] a nařízení vlády [7]. Rozhodujícím aspektem je ovšem období výstavby vedení a k tomuto datu platné normy, dle kterých byla konkrétní vedení vystavěna.

Vedení přenosové soustavy budovaná v minulých desetiletích byla projektována podle tehdy platných norem:

- ČSN ESČ 1950
- ČSN 341100/1959
- ČSN 341100/1964
- ČSN 341100/1974
- ČSN 333300/1984

V současné době je platná norma ČSN EN 50 341-1 (všeobecná část) pro vedení s napětím nad 45 kV. Tato norma definuje základní elektrickou vzdálenost D_{el} , která zabraňuje přeskoku živých částí na zařízení s potenciálem země při normálním provozu sítě. Velikost základní elektrické vzdálenosti D_{el} závisí na velikosti největšího napětí sítě U_s a je uvedena v tabulce 3.1:

Tab. 3.1 Základní elektrické vzdálenosti

Největší napětí sítě U_s [kV]	D_{el} [m]
123	1,00
245	1,70
420	2,80

Z této hodnoty je možné vypočítat nejkratší vnější vzdálenost. Jejím účelem je zamezit nebezpečí přeskoků vůči veřejnosti s ohledem na bezpečnost pohybu osob v blízkosti silových vedení. Nejkratší vzdálenost vodičů od země ve volné krajině vzdálené od budov, komunikací, železnic, vodních cest a také stromů je definována tabulkou 3.2:

Tab. 3.2 Nejkratší vnější vzdálenosti

Typ oblasti	Nejkratší vnější vzdálenost od země [m]
Volná krajina bez stromů	5+Del
Křižování pozemní komunikace či železnice	6+Del
Všeobecné rekreační plochy	7+Del

Pro výpočty elektrického a magnetického pole jsem použil hodnoty nejkratších vnějších vzdáleností, které odpovídají volné krajině bez stromů. Pro napěťovou hladinu 400 kV je to 7,8 m, pro napěťovou hladinu 220 kV je to 6,7 m a pro napěťovou hladinu 110 kV činí nejkratší vnější vzdálenost 6 m.

Další normou, která se zabývá hygienickými normami, je ČSN 33 2040 - Ochrana před účinky elektromagnetického pole 50 Hz v pásmu vlivu zařízení elektrizační soustavy. Tato norma definuje, že pásmo vlivu elektrického pole od zařízení elektrizační soustavy je prostor v okolí zařízení, kde intenzita elektrického pole ve výši 1,8 m nad zemí je vyšší než 1 kV/m. Pásmo vlivu magnetického pole je pak prostor v okolí zařízení elektrizační soustavy, kde je magnetická indukce vyšší než 0,1 mT.

V této normě jsou též určeny technické požadavky. V okolí zařízení elektrizační soustavy přístupných pouze osobám s elektrotechnickou kvalifikací nesmí intenzita elektrického pole na pochůzkových trasách ve výšce 1,8 m nad zemí a na pracovištích v prostoru provádění práce převýšit 15 kV/m. Překročí-li intenzita elektrického pole 15 kV/m, pak délka pobytu osob nesmí přesáhnout při intenzitě elektrického pole:

- do 20 kV/m 1,5 hodiny denně
- do 25 kV/m 0,5 hodiny denně

Oproti předchozí normě z roku 1979 je snížena přípustná úroveň intenzity elektrického pole v okolí obecně přístupných zařízení elektrizační soustavy z 15 na 10 kV/m ve výši 1,8 m nad zemí.

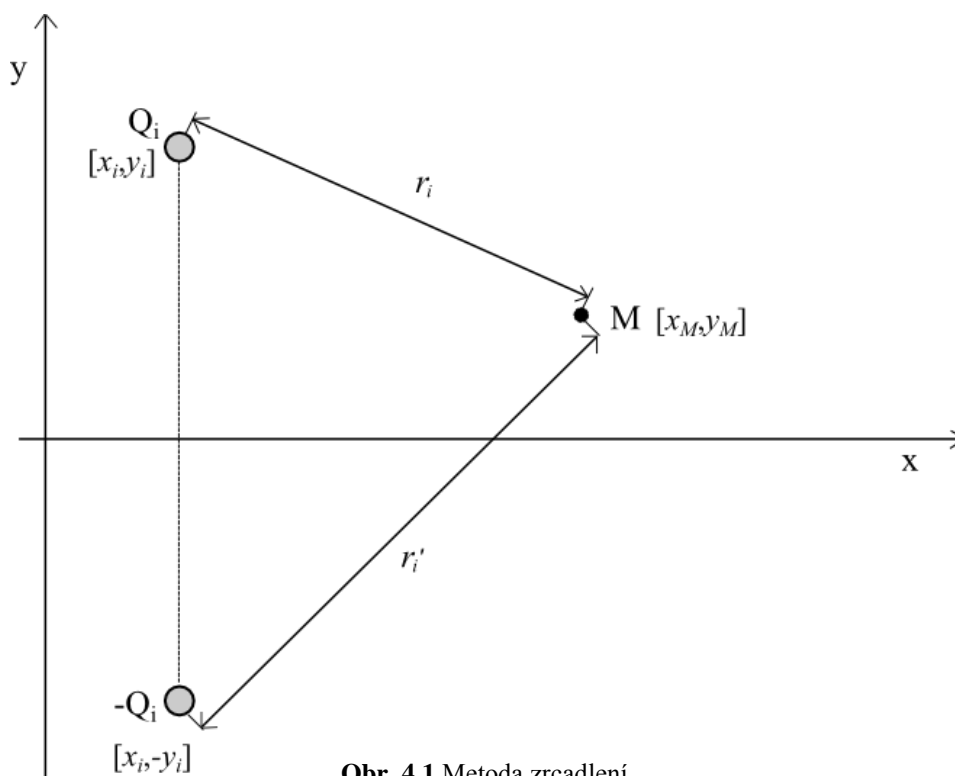
Na křižovatkách vedení se silničními komunikacemi I. a II. třídy je třeba vyloučit zastavení vozidel v pásmu vlivu elektrického pole, respektive v ochranném pásmu vedení. Na zákaz je nutno upozornit dopravní značkou. V pásmu vlivu elektroenergetických zařízení v prostorách přístupných osobám nesmí magnetická indukce převýšit hodnotu 0,5 mT.

Z hlediska intenzity elektrického a magnetického pole přichází v úvahu též Nařízení vlády č. 1/2008 Sb. O ochraně zdraví před neionizujícím zářením. To definuje referenční hodnoty intenzity elektrického pole a magnetické indukce při nepřetržité expozici. Pro frekvenci 50 Hz je pro zaměstnance mezní intenzita elektrického pole 10 kV/m a magnetická indukce 0,5 mT. Pro ostatní osoby jsou to hodnoty intenzity elektrického pole 5 kV/m a magnetické indukce 0,1 mT.

4. Metoda vyšetření elektrického pole

4.1. Metoda zrcadlení

Pro vyšetření rozložení elektrostatického pole vícevodičových soustav umístěných nad zemí se užívá metody zrcadlení. Nejprve uvažujeme jeden vodič - obr. 4.1. Je-li vodič s nábojem Q_i umístěn v prostředí s permitivitou ε v určité vzdálenosti od země, není možné určit elektrostatický potenciál přímo. Rozložení elektrického pole je dáno nejen nábojem na vodiči, ale také nábojem, který vznikl elektrostatickou indukcí na povrchu země. Zemský povrch se uvažuje jako dokonale vodivý a jeho potenciál je nulový. V tomto případě se náboj na vodiči zobrazí v souměrnosti podle hraniční roviny a tomuto obrazu se přiřadí stejně velký náboj ovšem opačné polarity. Potenciál v libovolném bodě prostoru s uvažovanou permitivitou ε je pak dán součtem potenciálů vzniklých působením náboje na vodiči a jeho obrazu. [3, str.220].



Obr. 4.1 Metoda zrcadlení

Pro potenciál v bodě M platí vztah:

$$\varphi = \frac{Q_i}{2\pi\ell\varepsilon} \ln \frac{r_i'}{r_i} \quad (1)$$

V případě vícevodičového systému je možné výsledný potenciál v daném bodě určit algebraickým součtem jednotlivých dvojic potenciálů.

4.2. Výpočet nábojů

K výpočtu rozložení elektrického pole v okolí dvojitého nadzemního vedení je zapotřebí určit náboje na jednotlivých vodičích. To je možné v případě, že jsou známy napětí jednotlivých vodičů a jejich konfigurace v prostoru. Pokud se aplikuje metoda zrcadlení pro vícevodičový systém, tak pro elektrické potenciály v místech, kde jsou umístěny vodiče, platí vztah:

$$\varphi = \underline{\mathbf{A}} \underline{\mathbf{Q}} \quad (2)$$

$\underline{\mathbf{A}}$...matice potenciálových koeficientů

$\underline{\mathbf{Q}}$...matice nábojů na jednotlivých vodičích

Pro potenciál i - tého vodiče platí vztah:

$$\varphi_i = \frac{Q_i}{2\pi\epsilon\ell} \ln \frac{2y_i}{R_i} + \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{2\pi\epsilon\ell} \ln \frac{b_{ij}}{d_{ij}} \quad i \neq j \quad (3)$$

n ... počet vodičů

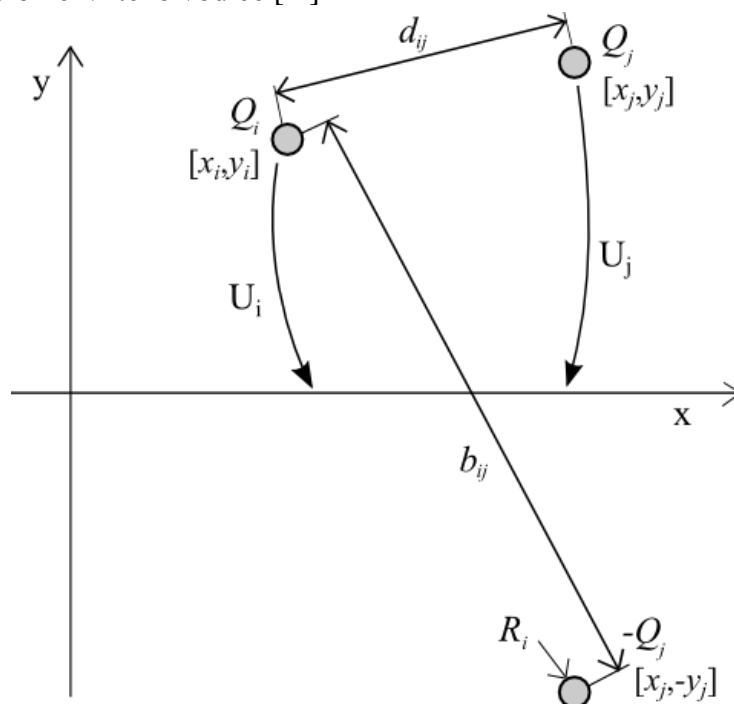
b_{ij} ... vzdálenost i - tého vodiče od obrazu j -tého vodiče [m]

d_{ij} ... vzdálenost i -tého vodiče od j -tého vodiče [m]

ℓ ...délka vodiče [m]

y_i ...výška i - tého vodiče nad zemí [m]

R_i ... vlastní poloměr i -tého vodiče [m]

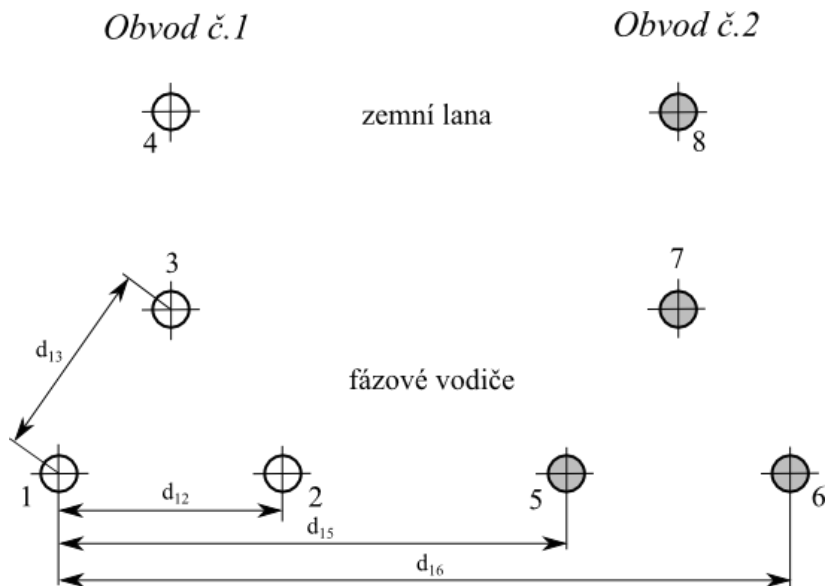


Obr. 4.2 Vyjádření potenciálových koeficientů

Náboje na jednotlivých vodičích se získají po úpravě maticové rovnice:

$$\underline{Q} = \underline{A}^{-1}\underline{\varphi} = \underline{B}\underline{\varphi} \quad (4)$$

Pro výpočet nábojů na jednotlivých vodičích venkovního vedení jsem použil postup uvedený v [1] [2]. Tento algoritmus uvažuje označení jednotlivých vodičů, které je znázorněno na obrázku 4.3:



Obr. 4.3 Konfigurace vodičů dvojitých nadzemních vedení se zemnicími lany

Indexy 1,2,3 odpovídají fázovým vodičům 1. obvodu, indexy 5,6,7 pak fázovým vodičům 2. obvodu. Zemnicí lano 1. obvodu je dáno indexem 4, zemnicí lano 2. obvodu je dáno indexem 8.

V prvním kroku výpočtu se počítají vlastní a vzájemné potenciálové koeficienty matice \mathbf{A} .

$$\mathbf{A} = \{a_{ij}\} \quad i, j = 1, 2, \dots, 8 \quad (5)$$

$$\alpha_{ii} = k \ln \frac{2y_i}{R_i} \quad \alpha_{ij} = k \ln \frac{b_{ij}}{d_{ij}} \quad (6)$$

R_i ... vlastní poloměr vodiče [m]

y_i ... výška i -tého vodiče nad zemí [m]

$$b_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2} \quad (7a)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad [\text{m}] \quad i, j = 1, 2, \dots, 8 \quad (7b)$$

$\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ je permitivita vakua

$$\text{Pro délku } \ell = 1 \text{ m nabývá konstanta } k \text{ tvaru: } k = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\ell} = 1,8 \cdot 10^{10} \text{ [F}^{-1}\text{]} \quad (8)$$

Po získání matice potenciálových koeficientů \mathbf{A} se vytvoří inverzní matice \mathbf{B} .

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1} = \{\beta_{ij}\} \quad i, j = 1, 2, \dots, 8 \quad (9)$$

Rozdělení matice \mathbf{B} na submatice naznačuje prvky matice, které berou v úvahu vzájemné kapacitanci projevy v obvodě č. 1 jako \mathbf{B}_{11} . Matice \mathbf{B}_{12} uvažuje kapacitanci spojenou s vodiči obou obvodů.

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{11} &= \{\beta_{ij}\}, & i = 1, 2, 3, 4 & \quad j = 1, 2, 3 \\ \mathbf{B}_{12} &= \{\beta_{ij}\}, & i = 1, 2, 3, 4 & \quad j = 5, 6, 7 \end{aligned} \quad (10)$$

Stejným postupem se vytvoří submatice \mathbf{B}_{21} a \mathbf{B}_{22} .

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{21} &= \{\beta_{ij}\}, & i = 5, 6, 7, 8 & \quad j = 1, 2, 3 \\ \mathbf{B}_{22} &= \{\beta_{ij}\}, & i = 5, 6, 7, 8 & \quad j = 5, 6, 7 \end{aligned} \quad (11)$$

Elektrické náboje na jednotlivých vodičích dvojitého vedení jsou dány prvky matice nábojů \mathbf{Q}_{ij} .

$$\mathbf{Q}_{ij} = \begin{bmatrix} U_1 \mathbf{B}_{11} \mathbf{p}_i + U_2 \mathbf{B}_{12} \mathbf{p}_j e^{j\delta} \\ U_1 \mathbf{B}_{21} \mathbf{p}_i + U_2 \mathbf{B}_{22} \mathbf{p}_j e^{j\delta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Různé rozmístění fází lze charakterizovat pomocí matice \mathbf{P} . Její vektory umožňují respektovat jednotlivé konfigurace fází a tomu odpovídající fázový posuv mezi napětími. V rovnici (12) odpovídá rozmístění fází obvodu č. 1 sloupci \mathbf{p}_i a obvodu č.2 sloupci \mathbf{p}_j .

$$\mathbf{P} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} & 1 & 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{kde } \mathbf{a} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \dots \text{operátor posunutí o } 120^\circ \quad (14)$$

$\delta \dots$ fázový posuv mezi napětími obou obvodů

4.3. Výpočet intenzity elektrického pole

Pro výpočet rozložení elektrického pole je nutné předpokládat přímé a paralelní vodiče umístěné nad dokonale vodivou zemí ve výšce y_i . Se znalostí velikosti nábojů na jednotlivých vodičích a jejich polohou lze určit jednotlivé příspěvky elektrické intenzity od jednotlivých vodičů a jejich obrazů v daném bodě. Tyto příspěvky se rozloží do složek x a y .

K samotnému vyšetření elektrického pole v okolí jsem aplikoval vztahy uvedené v [1].

Pro složky E_x a E_y fázoru intenzity elektrického pole vzniklé působením i -tého vodiče a jeho obrazu v libovolném bodě prostoru M s definovanými souřadnicemi $[x_m, y_m]$, platí následující vztahy:

$$E_{xi}(M) = kQ_i D_{xi} \quad E_{yi}(M) = kQ_i D_{yi} \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (15)$$

kde:

$$D_{xi} = (x_M - x_i) \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_i'^2} \right) \quad D_{yi} = \frac{y_i - y_M}{r_i^2} + \frac{y_i + y_M}{r_i'^2} \quad (16)$$

$$r_i = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2} \quad \text{vzdálenost bodu } M \text{ od } i\text{-tého vodiče [m]} \quad (17)$$

$$r_i' = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M + y_i)^2} \quad \text{vzdálenost bodu } M \text{ od obrazu } i\text{-tého vodiče [m]}$$

$$k = 1,8 \cdot 10^{10} \text{ [F}^{-1}] \quad (18)$$

Pro vícevodičový systém lze provést superpozice daných složek intenzity elektrického pole vzniklé působením náboje na jednotlivých vodičích.

$$E_{xM} = \sum_i E_{xi}(M)$$

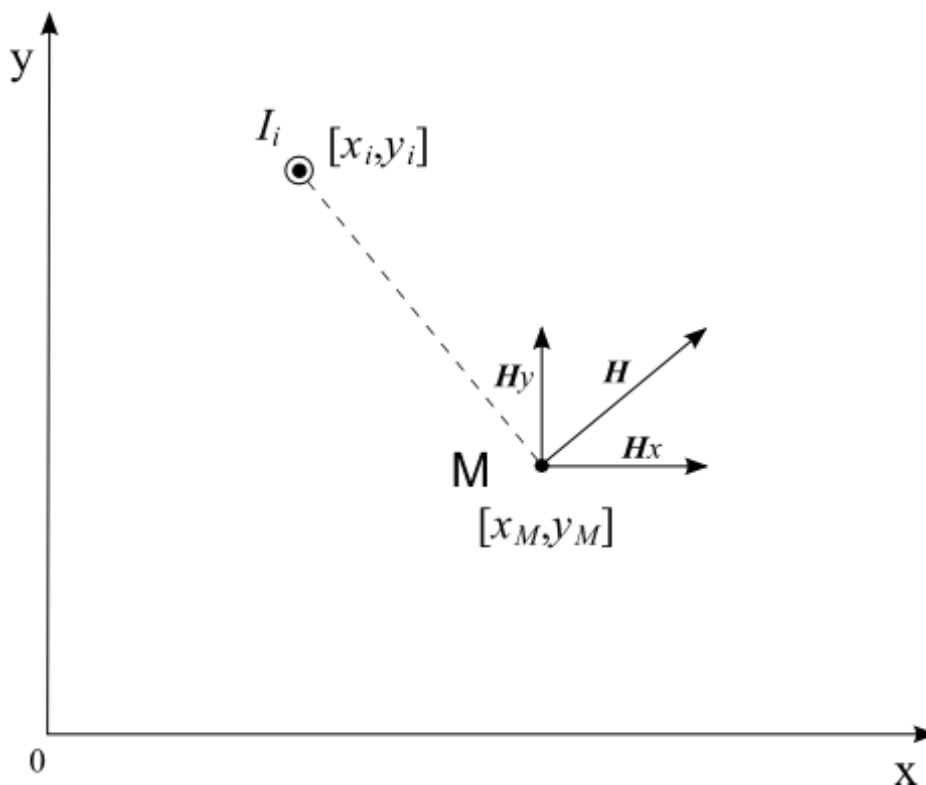
$$E_{yM} = \sum_i E_{yi}(M) \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (19)$$

Výslednou hodnotu intenzity elektrického pole v bodě M je možné určit ze vztahu:

$$E_M = \sqrt{|E_{xM}|^2 + |E_{yM}|^2} \quad (20)$$

5. Metoda vyšetření magnetického pole

Magnetické pole se vyskytuje v blízkosti vodičů s elektrickým proudem, což vychází z definice 1. Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru.



Obr. 5.1 Rozložení intenzity magnetického pole do složek

Při výpočtu rozložení intenzity magnetického pole v okolí vedení se uvažují dlouhé rovnoběžné vodiče, harmonický průběh proudu a ustálený stav. Poté je možno nahradit časově proměnnou hodnotu proudu jeho fázorem. Vyšetření magnetického pole vychází z postupu výpočtu [1]. Výsledné magnetické pole v okolí vedení je dáno superpozicí intenzit magnetického pole od jednotlivých vodičů. Superpozice je nutné provádět po složkách.

Velikost složky H_x fázoru intenzity magnetického pole, vybuzeného i -tým vodičem v libovolném bodě prostoru M s definovanými souřadnicemi $[x_m, y_m]$, je dána vztahem:

$$H_{xi}(M) = \frac{I_i}{2\pi} \frac{y_i - y_M}{r_i^2} \quad (21)$$

Pro složku H_y fázoru platí analogický vztah:

$$H_{yi}(M) = \frac{I_i}{2\pi} \frac{x_i - x_M}{r_i^2} \quad (22)$$

$$\text{kde } r_i = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2} \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (23)$$

I_i ... fázor proudu i -tého vodiče [A]

$[x_i, y_i]$... souřadnice i -tého vodiče

Pro získání velikosti fázorů v jednotlivých složkách je třeba provést superpozici složek od jednotlivých vodičů:

$$H_{xM} = \sum_i H_{xi}(M) \quad H_{yM} = \sum_i H_{yi}(M) \quad (24)$$

Výsledná velikost fázoru intenzity magnetického pole je pak dána vztahem:

$$H_M = \sqrt{|H_{xM}|^2 + |H_{yM}|^2} \quad (25)$$

Velikost magnetické indukce v daném bodě je možné určit pomocí vztahu mezi intenzitou magnetického pole a magnetickou indukcí:

$$B_M = \mu H_M \text{ [T]} \quad (26)$$

$$\mu = 4\pi 10^{-7} \text{ [H/m]} \text{ permeabilita prostředí - vzduchu} \quad (27)$$

6. Výpočet rozložení intenzity elektrického a magnetického pole stožárů Donau, Dvojitý Portál a Soudek

Ze stožárů užívaných pro přenos elektrické energie venkovními vedeními jsem zvolil tři základní typy dvojitých vedení. Jejich výhodou je skutečnost, že vzájemná interakce obou vedení umožňuje účinnější možnosti pro vykompenzování jak elektrického, tak i magnetického pole. U dvojitých vedení má tak konfigurace fází na stožáru významný vliv na rozložení elektrického a magnetického pole v jeho okolí. Stožár Donau reprezentuje napěťovou hladinu 400 kV. Zástupcem napěťové hladiny 220 kV je stožár Dvojitý Portál. Stožár Soudek pak zastupuje napěťovou hladinu 110 kV.

Do výpočtů jsem nezařadil stožáry napěťové hladiny vysokého napětí 22 kV. Po provedení kontrolního výpočtu jsem totiž zjistil, že hodnoty elektrické intenzity a intenzity magnetického pole vykazují řádově nižší hodnoty než u stožárů vvn a zvn.

Cílem výpočtu bylo zjistit hodnotu elektrické intenzity a intenzity magnetického pole ve výšce 1,8 m nad zemí v dosahu 40 m od osy stožáru, která je ztotožněná s osou „y“. Výpočet byl prováděn pro dvě vzdálenosti vodičů od země. Základní výšce odpovídají vzdálenosti dané samotnou konstrukcí stožáru. Poloha jednotlivých vodičů stožáru Donau se shoduje s obrázkem 2.1, stožáru Dvojitý Portál s obrázkem 2.2 a stožáru Soudek s obrázkem 2.3. Minimální výška určuje polohu vodičů v maximálním průhybu, kde je minimální výška spodních vodičů nad zemí definována normou pro oblast volné krajiny bez stromů. Pro stožár Donau je to 7,8 m, pro stožár Dvojitý Portál je to 6,7 m a pro stožár Soudek je 6 m.

Ve všech výpočtech intenzity elektrického pole se uvažují amplitudy fázového napětí vůči zemi. Pro stožár Donau napěťové hladiny 400 kV je amplituda fázového napětí vůči zemi rovna 326,6 kV. Pro stožár Dvojitý Portál napěťové hladiny 220 kV činí tato hodnota 179,6 kV a u stožáru Soudek napěťové hladiny 110 kV je to 89,8 kV.

Ve všech výpočtech intenzity magnetického pole se uvažují amplitudy proudů jednotlivých fází. Tyto hodnoty jsou určeny z velikosti přirozeného výkonu přenášeného vedením na dané napěťové hladině. Velikost amplitudy proudu je u stožáru Donau 790 A, u stožáru Dvojitý Portál 450 A a u stožáru Soudek 340 A.

U dvojitých vedení existuje celkově 36 možných způsobů konfigurace fázových vodičů, ovšem pouze 6 z nich vykazuje rozdílné výsledky. Těchto 6 rozmístění fází je uvažováno pro vyšetření elektrické intenzity a intenzity magnetického pole jednotlivých stožárů. U každého stožáru je při výpočtech elektrického a magnetického pole uvedena tabulka maximálních hodnot daných veličin odpovídající konkrétní konfiguraci fází na daném stožáru. Tabulka je vždy doplněna grafem, který popisuje průběhy jednotlivých konfigurací fází dané veličiny.

Jednotlivým fázím odpovídají v tabulkách značky: ● fáze u
○ fáze v
× fáze w

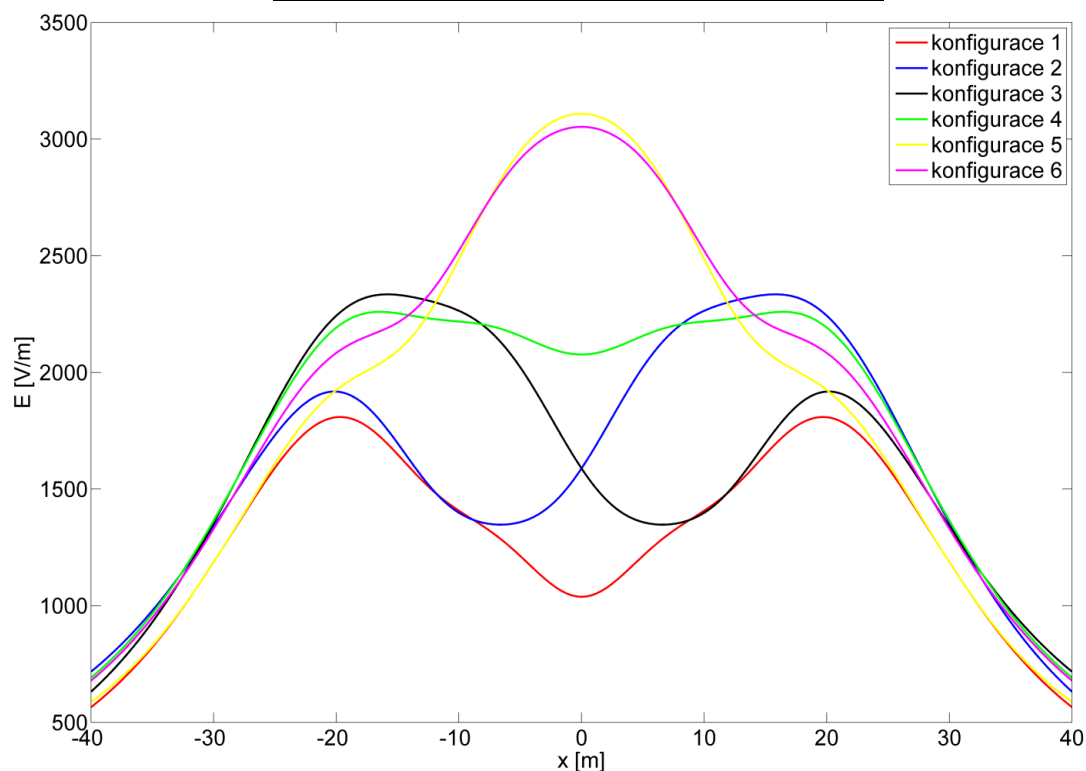
Samotný výpočet a z něj plynoucí grafy jsem provedl pomocí programu Matlab 7.1.

6.1. Výpočet intenzity elektrického pole základní výšky

a) Stožár Donau

Tab. 6.1 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Donau

	Konfigurace fází	Maximum E [V/m]						
1.	<table style="border: none; text-align: center; width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">×</td> <td style="width: 50%;">○</td> </tr> <tr> <td>●</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>×</td> <td>●</td> </tr> </table>	×	○	●	○	×	●	1808,7
×	○							
●	○							
×	●							
2.	<table style="border: none; text-align: center; width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">×</td> <td style="width: 50%;">●</td> </tr> <tr> <td>●</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>×</td> <td>○</td> </tr> </table>	×	●	●	○	×	○	2334,5
×	●							
●	○							
×	○							
3.	<table style="border: none; text-align: center; width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">×</td> <td style="width: 50%;">○</td> </tr> <tr> <td>●</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>●</td> <td>×</td> </tr> </table>	×	○	●	○	●	×	2334,5
×	○							
●	○							
●	×							
4.	<table style="border: none; text-align: center; width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">×</td> <td style="width: 50%;">×</td> </tr> <tr> <td>●</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>●</td> <td>○</td> </tr> </table>	×	×	●	○	●	○	2259,5
×	×							
●	○							
●	○							
5.	<table style="border: none; text-align: center; width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">×</td> <td style="width: 50%;">×</td> </tr> <tr> <td>●</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>○</td> <td>●</td> </tr> </table>	×	×	●	○	○	●	3108,6
×	×							
●	○							
○	●							
6.	<table style="border: none; text-align: center; width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">×</td> <td style="width: 50%;">●</td> </tr> <tr> <td>●</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>○</td> <td>×</td> </tr> </table>	×	●	●	○	○	×	3052,5
×	●							
●	○							
○	×							



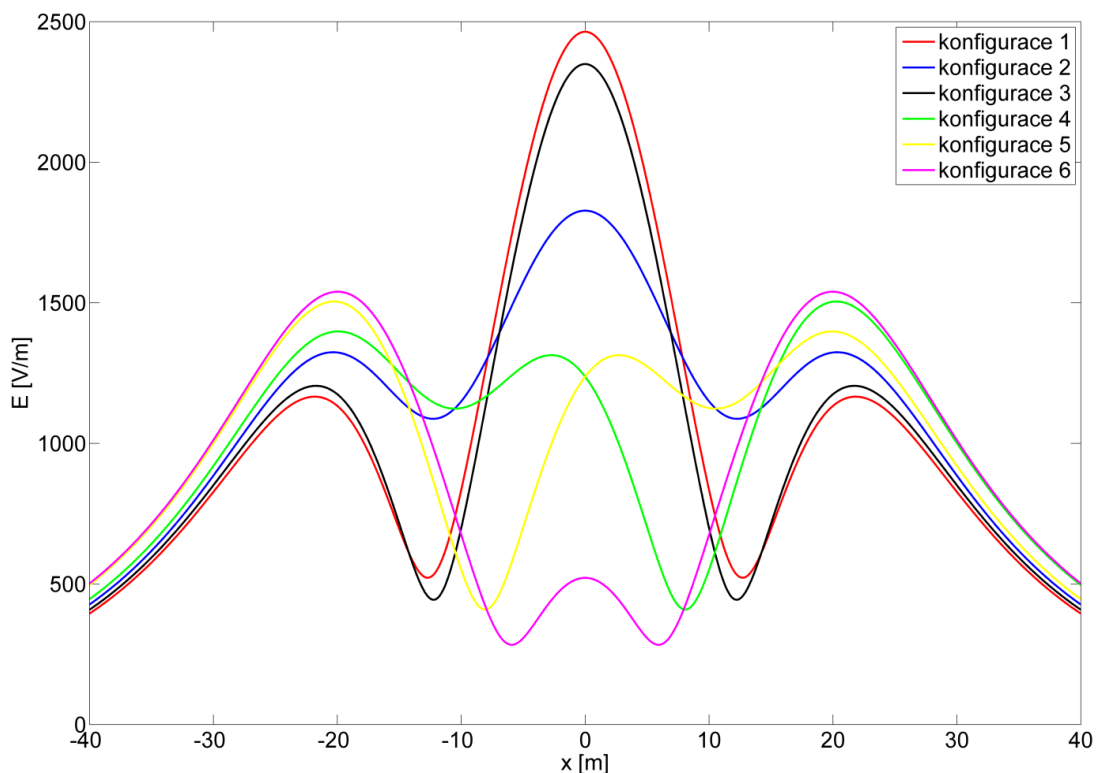
Obr. 6.1 Graf elektrické intenzity stožáru Donau základní výšky

Pásmo vlivu elektrického pole od zařízení ES je oblast, kde hodnota elektrické intenzity přesáhne hodnotu 1 kV/m ve výšce 1,8 m nad zemí. V případě stožáru Donau pro všechny konfigurace fází zahrnuje prostor vzdálený přes 30 m od osy stožáru. Nejpříznivější rozložení elektrického pole vykazuje 1. konfigurace fází.

b) Stožár Dvojitý Portál

Tab. 6.2 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Dvojitý Portál

Konfigurace fází		Maximum E [V/m]
1.	● ○ × × ○ ●	2463,9
2.	● ○ × ○ × ●	1827,7
3.	● ○ × × ● ○	2349,2
4.	● ○ × ○ ● ×	1504,5
5.	● ○ × ● × ○	1504,5
6.	● ○ × ● ○ ×	1539,4


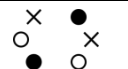
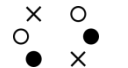
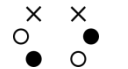
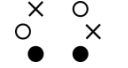
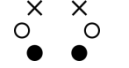


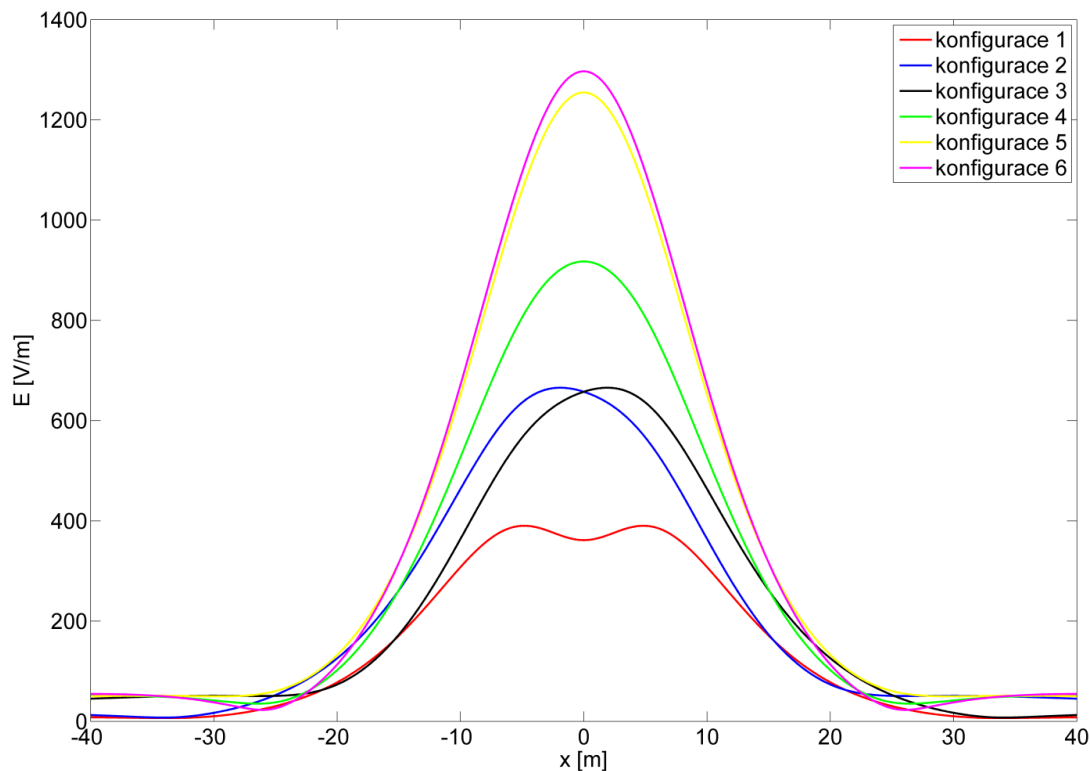
Obr. 6.2 Graf elektrické intenzity stožáru Dvojitý Portál základní výšky

U stožáru Dvojitý Portál je pásmo vlivu elektrického pole mírně užší oproti stožáru Donau. Vzdálenost od osy stožáru je menší než 30 m pro všechna rozmístění fází vyjma 6. konfigurace. Ta vykazuje zajímavé rozložení elektrické intenzity. V blízkosti osy stožáru je elektrická intenzita nižší a až ve vzdálenosti přes 10 m od osy stožáru dosahuje intenzita hodnoty 1 kV/m.

c) Stožár Soudek

Tab. 6.3 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Soudek

Konfigurace fází	Maximum E [V/m]
1. 	390,19
2. 	665,62
3. 	665,62
4. 	917,57
5. 	1254,7
6. 	1297,0




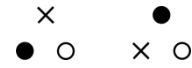

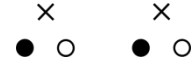
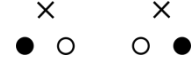

Obr. 6.3 Graf elektrické intenzity stožáru Soudek základní výšky

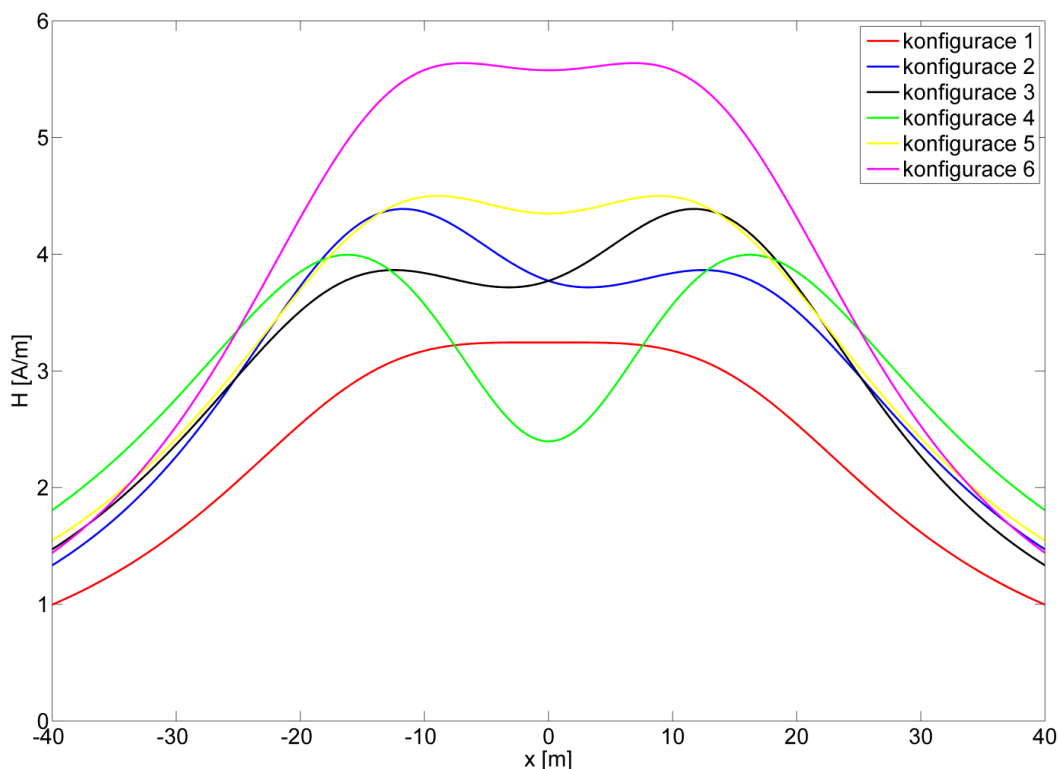
Nejúčinnější vykompenzování elektrického pole umožňuje stožár Soudek. Maximální hodnota intenzity elektrického pole pro nejnepříznivější rozmístění fází je 3,3 krát větší než u nejhodnějšího rozmístění fází. Pásmo vlivu elektrického pole je výrazně užší než u předchozích stožárů. Zasahuje do vzdálenosti nižší než 10 m od osy stožáru a to jen pro 5. a 6. konfiguraci fází.

6.2. Výpočet intenzity magnetického pole základní výšky

a) Stožár Donau

Tab. 6.4 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Donau

Konfigurace fází	Maximum H [A/m]	Maximum B [μ T]
1. 	3,2436	4,0760
2. 	4,3876	5,5136
3. 	4,3876	5,5136
4. 	3,9950	5,0202
5. 	4,4991	5,6537
6. 	5,6372	7,0839



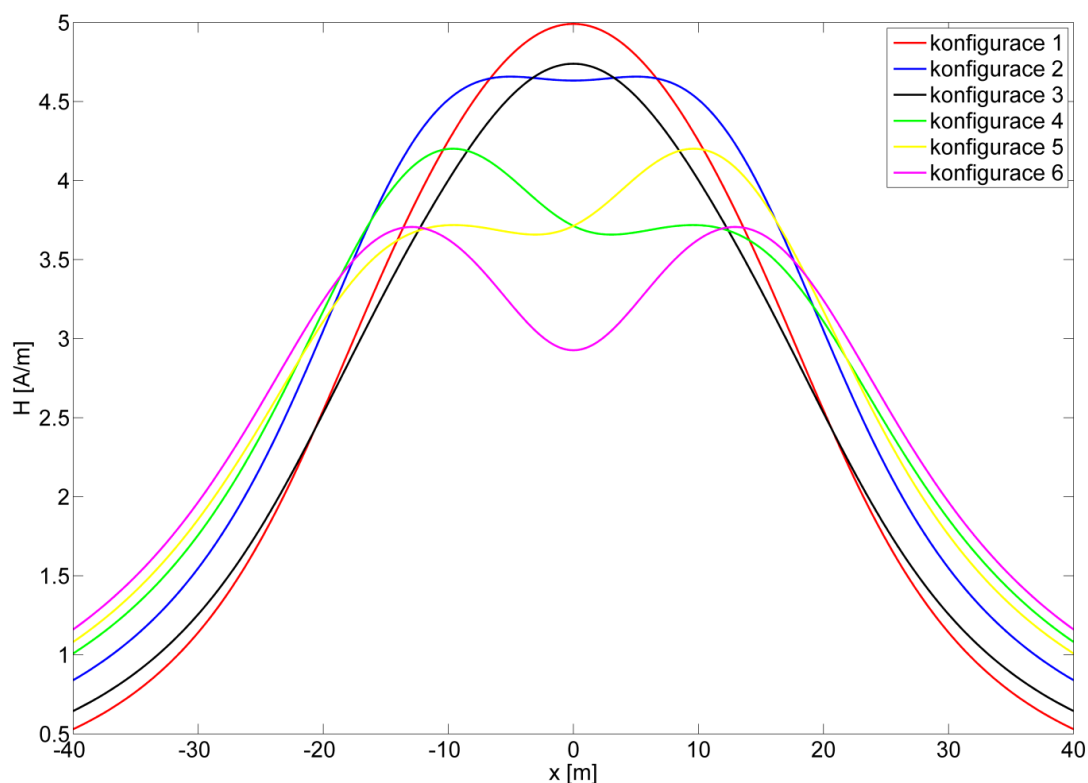
Obr. 6.4 Graf intenzity magnetického pole stožáru Donau základní výšky

Symetrické rozmístění fází oproti ostatním stožárům nedosahuje nejvyšší hodnoty intenzity magnetického pole. Nejvhodnější rozložení magnetického pole vykazuje 1. konfigurace.

b) Stožár Dvojitý Portál

Tab. 6.5 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Dvojitý Portál

	Konfigurace fází	Maximum H [A/m]	Maximum B [μ T]
1.	● ○ × × ○ ●	4,9909	6,2718
2.	● ○ × ○ × ●	4,6574	5,8526
3.	● ○ × × ● ○	4,7387	5,9549
4.	● ○ × ○ ● ×	4,2014	5,2796
5.	● ○ × ● × ○	4,2014	5,2796
6.	● ○ × ● ○ ×	3,7064	4,6576



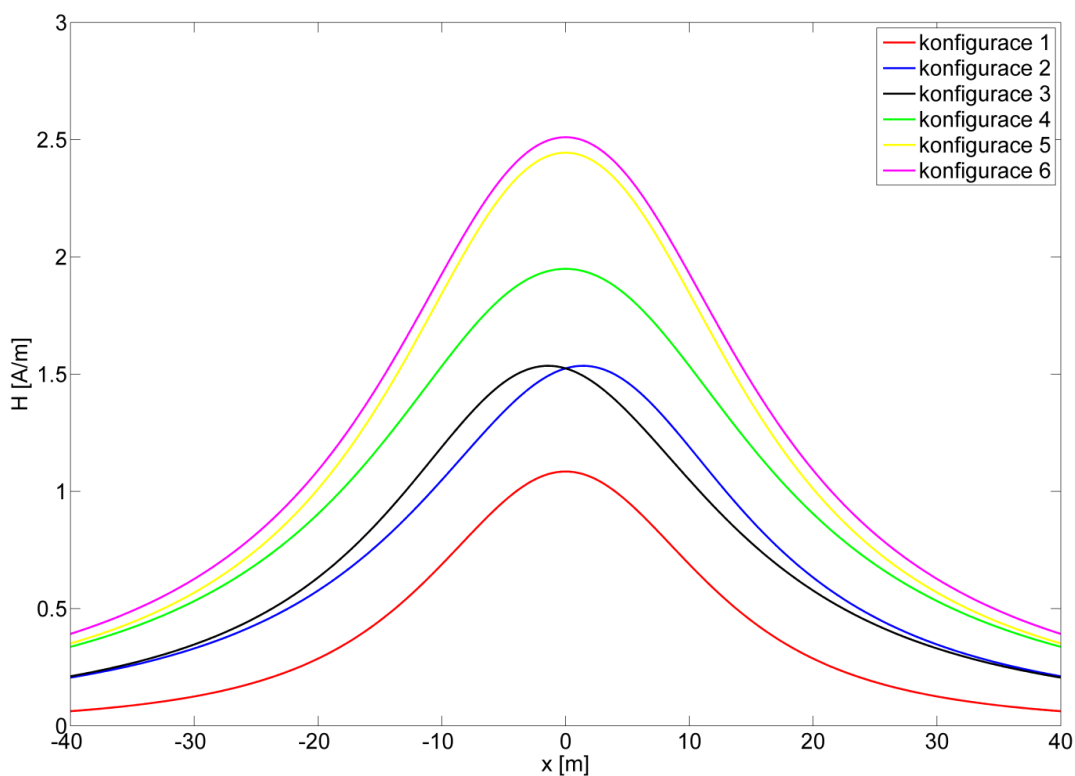
Obr. 6.5 Graf intenzity magnetického pole stožáru Dvojitý Portál základní výšky

Maximální hodnota intenzity magnetického pole a magnetické indukce je zjištěna u 1. konfigurace fází. Schopnost vzájemného vykompenzování je ze všech stožárů nejnižší. Poměr maximálních hodnot intenzity magnetického pole nejnejpříznivějšího a nejvhodnějšího rozmístění fází činí pouze 1,37.

c) Stožár Soudek

Tab. 6.6 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Soudek

Konfigurace fází	Maximum H [A/m]	Maximum B [μ T]
1.	1,0844	1,3627
2.	1,5353	1,9293
3.	1,5353	1,9293
4.	1,9488	2,4489
5.	2,4442	3,0715
6.	2,5102	3,1544



Obr. 6.6 Graf intenzity magnetického pole stožáru Soudek základní výšky

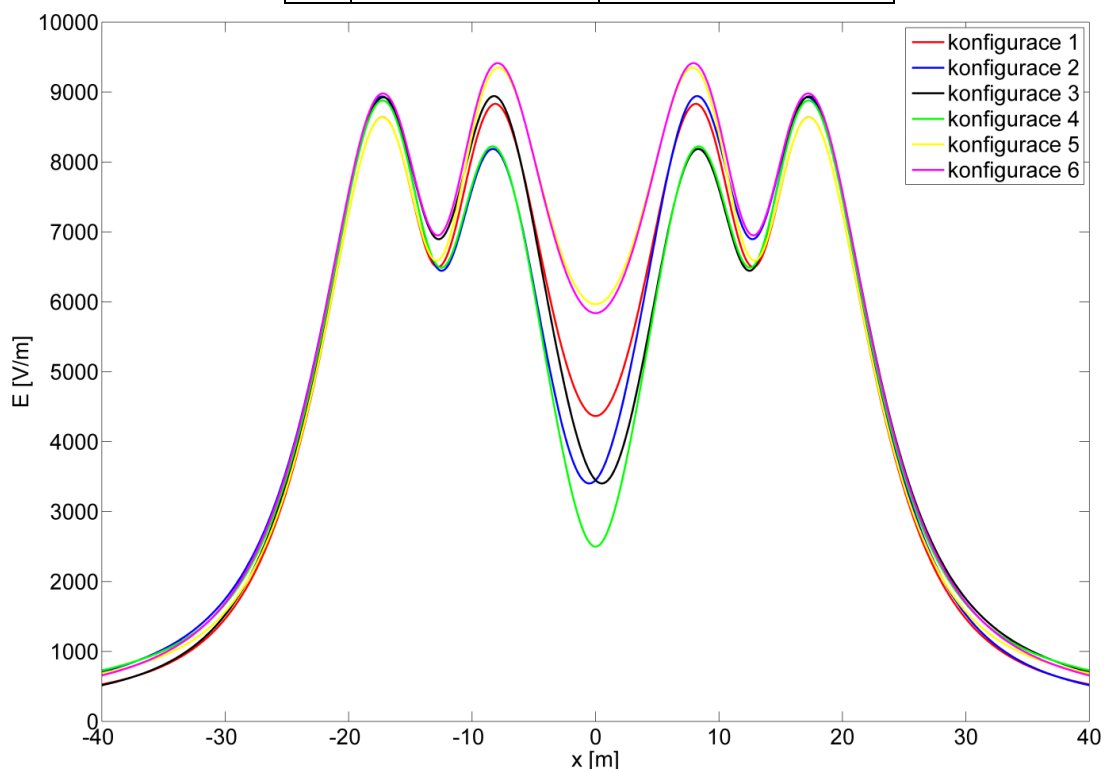
Největší vzájemné vykompenzování magnetického pole vykazuje stožár Soudek. Poměr maximálních hodnot intenzity nejnepříznivějšího a nejvhodnějšího rozmístění fází činí 2,31. Nejnepříznivější rozložení intenzity magnetického pole zde vykazuje symetrické rozmístění fází.

6.3. Výpočet intenzity elektrického pole minimální výšky

a) Stožár Donau

Tab. 6.7 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Donau

	Konfigurace fází	Maximum E [V/m]						
1.	<table style="border: none; text-align: center; margin: auto;"> <tr><td>×</td><td>○</td></tr> <tr><td>●</td><td>○</td></tr> <tr><td>×</td><td>●</td></tr> </table>	×	○	●	○	×	●	8831,2
×	○							
●	○							
×	●							
2.	<table style="border: none; text-align: center; margin: auto;"> <tr><td>×</td><td>●</td></tr> <tr><td>●</td><td>○</td></tr> <tr><td>×</td><td>○</td></tr> </table>	×	●	●	○	×	○	8942,0
×	●							
●	○							
×	○							
3.	<table style="border: none; text-align: center; margin: auto;"> <tr><td>×</td><td>○</td></tr> <tr><td>●</td><td>○</td></tr> <tr><td>●</td><td>×</td></tr> </table>	×	○	●	○	●	×	8942,0
×	○							
●	○							
●	×							
4.	<table style="border: none; text-align: center; margin: auto;"> <tr><td>×</td><td>×</td></tr> <tr><td>●</td><td>○</td></tr> <tr><td>●</td><td>○</td></tr> </table>	×	×	●	○	●	○	8879,0
×	×							
●	○							
●	○							
5.	<table style="border: none; text-align: center; margin: auto;"> <tr><td>×</td><td>×</td></tr> <tr><td>●</td><td>○</td></tr> <tr><td>○</td><td>●</td></tr> </table>	×	×	●	○	○	●	9348,5
×	×							
●	○							
○	●							
6.	<table style="border: none; text-align: center; margin: auto;"> <tr><td>×</td><td>●</td></tr> <tr><td>●</td><td>○</td></tr> <tr><td>○</td><td>×</td></tr> </table>	×	●	●	○	○	×	9414,0
×	●							
●	○							
○	×							



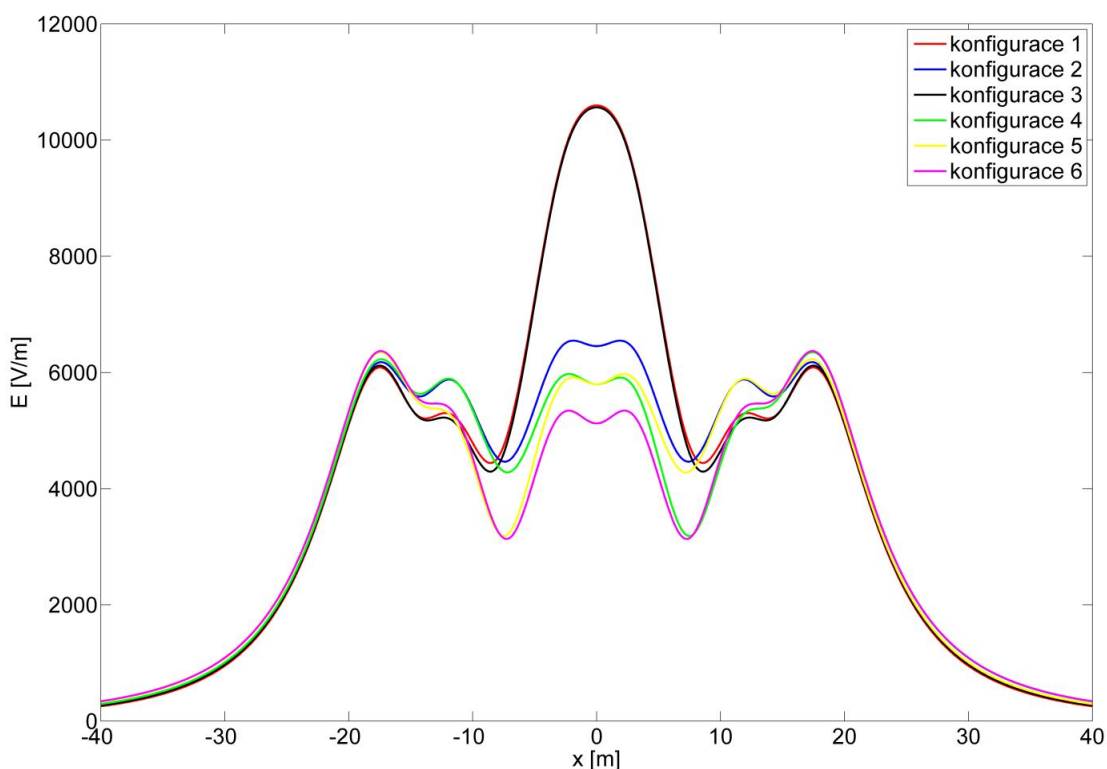
Obr. 6.7 Graf elektrické intenzity stožáru Donau minimální výšky

U rozložení elektrického pole je patrný vliv menší vzdálenosti spodních vodičů. U stožáru Donau je možné vidět čtyři poměrně výrazné lokální extrémy, jejichž poloha se shoduje s polohou vodičů umístěných na spodním pásu konzol. K největšímu rozdílu mezi jednotlivými konfiguracemi fází dochází v oblasti okolí osy stožáru. K nejvýraznějšímu vzájemnému vykompenzování elektrického pole v této oblasti dochází u 4. konfigurace fází.

b) Stožár Dvojitý Portál

Tab. 6.8 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Dvojitý Portál

	Konfigurace fází	Maximum E [V/m]
1.	● ○ × × ○ ●	10597
2.	● ○ × ○ × ●	6547,9
3.	● ○ × × ● ○	10563
4.	● ○ × ○ ● ×	6350,3
5.	● ○ × ● × ○	6350,3
6.	● ○ × ● ○ ×	6368,4



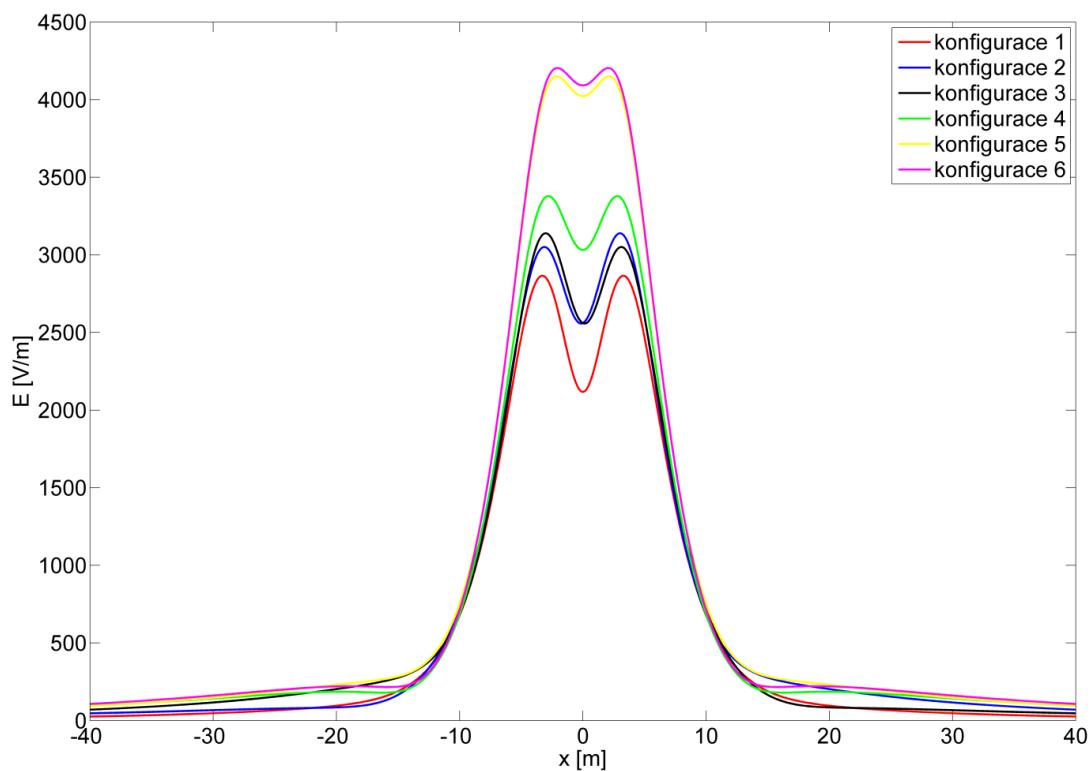
Obr. 6.8 Graf elektrické intenzity stožáru Dvojitý Portál minimální výšky

U stožáru Dvojitý Portál se odlišuje 1. a 3. konfigurace od zbylých ostatních. V ose stožáru mají tyto dvě konfigurace maximální hodnotu elektrické intenzity, která výrazně převyšuje maximální hodnoty elektrické intenzity ostatních konfigurací fází. Tento fakt je patrně dán tím, že 1. a 3. konfigurace mají u osy stožáru umístěnou shodnou fázi.

c) Stožár Soudek

Tab. 6.9 Konfigurace fází a maximální hodnoty elektrické intenzity stožáru Soudek

	Konfigurace fází	Maximum E [V/m]
1.	<pre> x ● ○ ○ ● x </pre>	2865,7
2.	<pre> x ● ○ x ● ○ </pre>	3139,4
3.	<pre> x ○ ○ ● ● x </pre>	3139,4
4.	<pre> x x ○ ● ● ○ </pre>	3378,8
5.	<pre> x ○ ○ x ● ● </pre>	4149,3
6.	<pre> x x ○ ○ ● ● </pre>	4203,5



Obr. 6.9 Graf elektrické intenzity stožáru Soudek minimální výšky

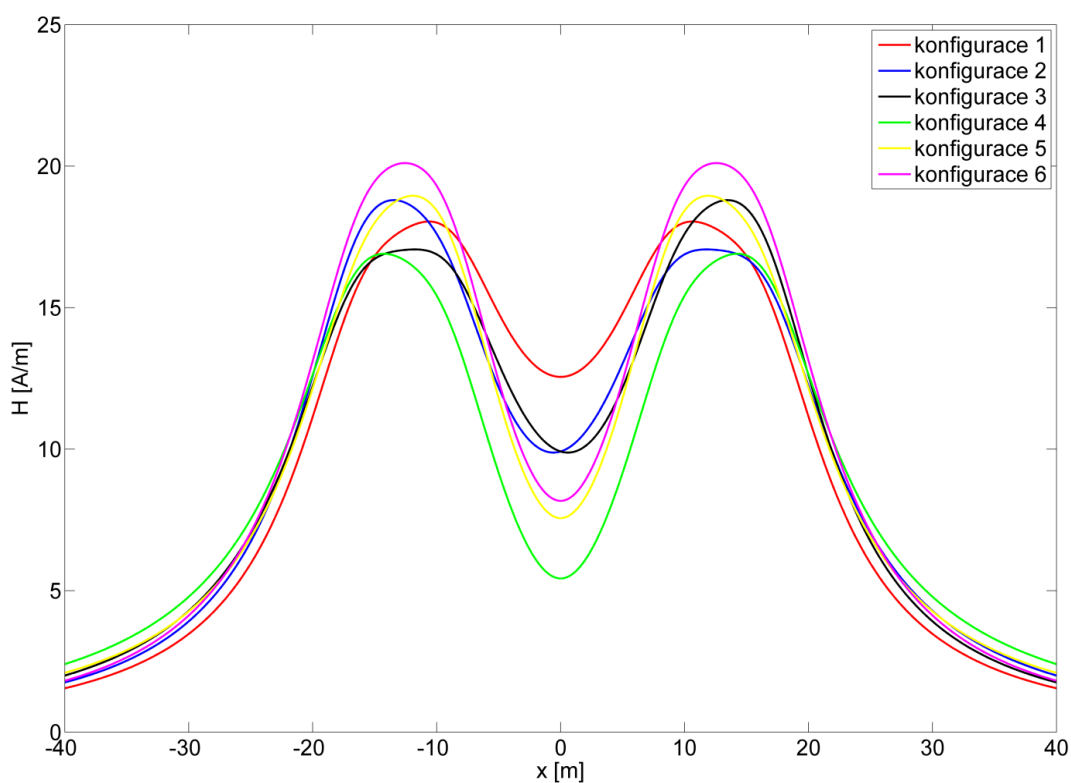
Průběhy elektrické intenzity u stožáru Soudek ukazují, že oproti ostatním stožárům dosahuje vyšších hodnot elektrická intenzita pouze v okolí osy stožáru. Pokles elektrické intenzity s ohledem na rostoucí vzdálenost od osy stožáru je taktéž výrazně strmější. Nejnepříznivější rozložení elektrické intenzity je u symetrického rozmístění fází.

6.4. Výpočet intenzity magnetického pole minimální výšky

a) Stožár Donau

Tab. 6.10 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Donau

	Konfigurace fází	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1.		18,0408	22,671
2.		18,7972	23,621
3.		18,7972	23,621
4.		16,9030	21,241
5.		18,9520	23,816
6.		20,1066	25,267



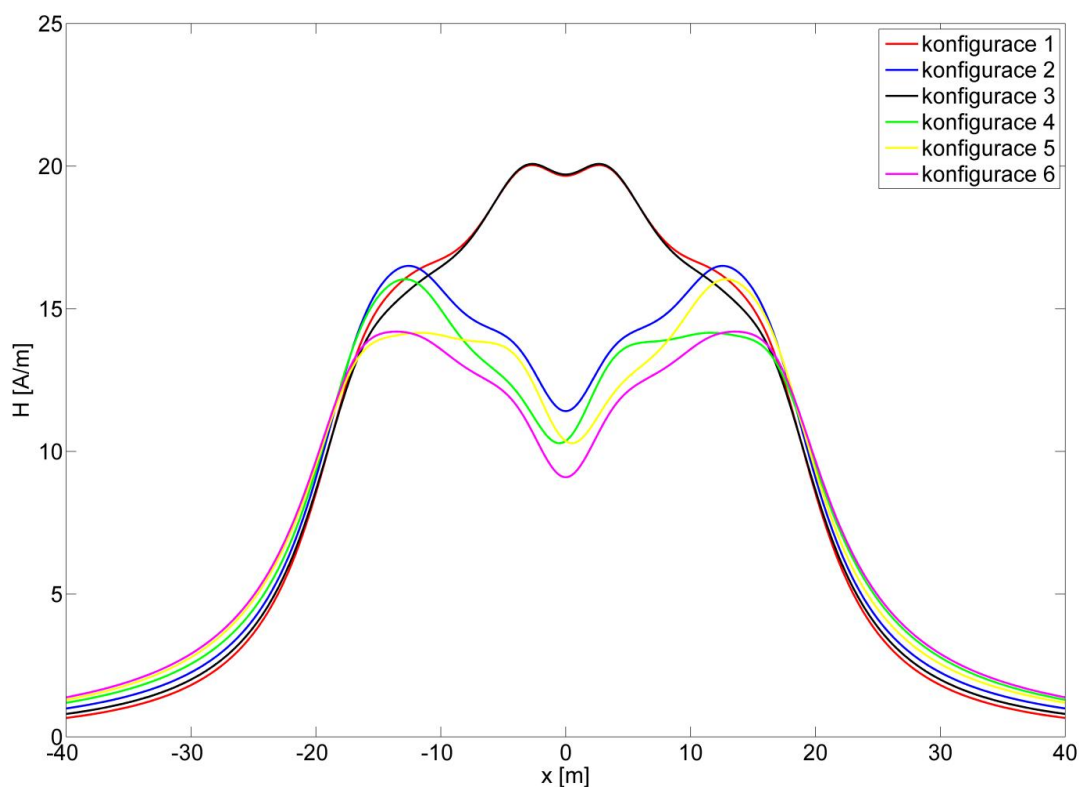
Obr. 6.10 Graf intenzity magnetického pole stožáru Donau minimální výšky

Průběhy intenzity magnetického pole všech konfigurací vykazují dva lokální extrém. Jejich poloha odpovídá poloze dvojice vodičů na spodní konzole stožáru. Největšímu vykompenzování intenzity magnetického pole v ose stožáru dochází u 4. konfigurace fází.

b) Stožár Dvojitý Portál

Tab. 6.11 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Dvojitý Portál

	Konfigurace fází	Maximum H [A/m]	Maximum B [μ T]
1.	● ○ × × ○ ●	20,038	25,180
2.	● ○ × ○ × ●	16,504	20,739
3.	● ○ × × ● ○	20,076	25,229
4.	● ○ × ○ ● ×	16,038	20,153
5.	● ○ × ● × ○	16,038	20,153
6.	● ○ × ● ○ ×	14,199	17,843

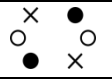
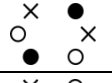
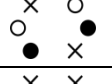
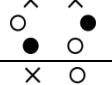
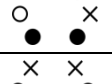
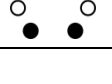


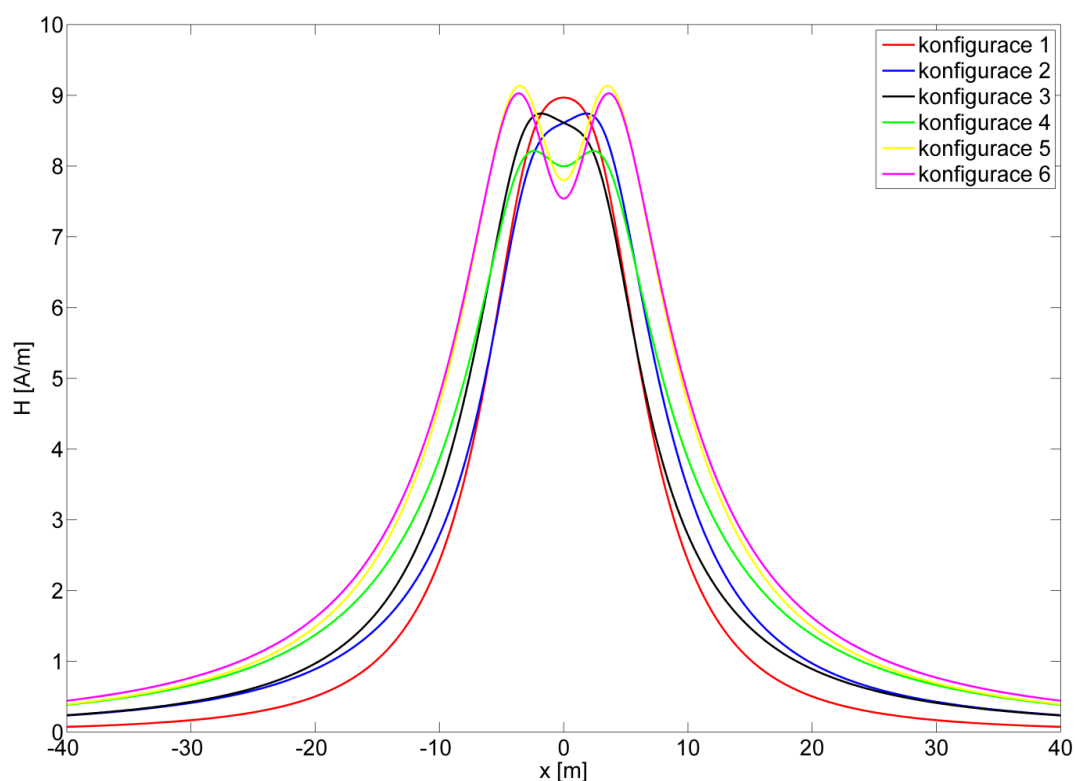
Obr. 6.11 Graf intenzity magnetického pole stožáru Dvojitý Portál minimální výšky

U stožáru Dvojitý portál se stejně jako v případě elektrického pole odlišuje 1. a 3. konfigurace od ostatních konfigurací fází. Tato dvě rozmístění fází mají v ose stožáru zvýšenou hodnotu intenzity magnetického pole. Naproti tomu ostatní konfigurace fází, které mají u osy stožáru rozdílné fáze, vykazují v oblasti osy stožáru pokles intenzity magnetického pole.

c) Stožár Soudek

Tab. 6.12 Konfigurace fází a maximální hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce stožáru Soudek

Konfigurace fází	Maximum H [A/m]	Maximum B [μT]
1. 	8,9673	11,269
2. 	8,7425	10,986
3. 	8,7425	10,986
4. 	8,2140	10,322
5. 	9,1357	11,480
6. 	9,0281	11,345



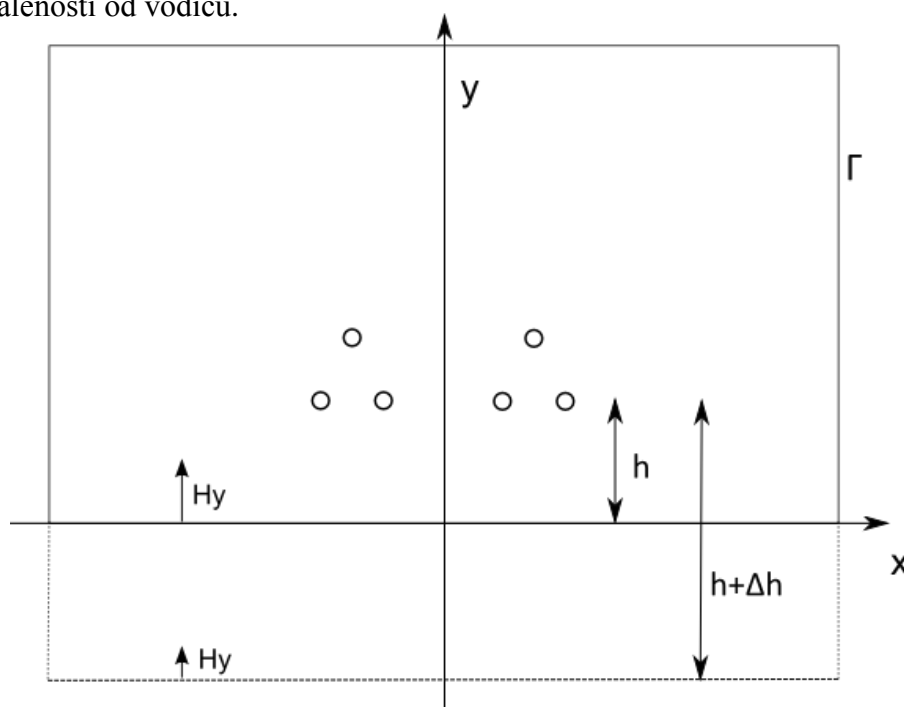
Obr. 6.12 Graf intenzity magnetického pole stožáru Soudek minimální výšky

Průběhy intenzity magnetického pole stožáru Soudek odpovídající jednotlivým rozmístěním fází nevykazují takové rozdíly jako ostatní stožáry.

7. Numerický výpočet elektrického a magnetického pole programem QuickField

7.1. Modelování magnetického pole

Program QuickField řeší magnetické pole vybuzeané harmonickým proudem jako okrajovou úlohu pro vektorový magnetický potenciál A . Jedná se o řešení magnetického pole v rovině x - y . Vyšetřovaná oblast je v tomto případě volena ve tvaru obdélníku. Pro řešení je dále zapotřebí nadefinovat okrajové podmínky. Na hranici oblasti Γ je uvažováno, že z -ová složka vektorového magnetického potenciálu se rovná nule. Pokud se řeší magnetické pole v rovině x - y , tak hranice oblasti Γ je považována za siločáru vektorového magnetického potenciálu. Vždy je ovšem nutné zvážit, zdali je spodní strana hranice v dostatečné vzdálenosti od vodičů. Pokud je v dané vzdálenosti složka y intenzity magnetického pole tak malá, že je možné ji zanedbat, lze pak zanedbat i zakřivení siločáry vektorového potenciálu. V opačném případě je nutné posunout spodní část hranice oblasti do větší vzdálenosti od vodičů.



Obr. 7.1 Volba vzdálenosti spodní hranice oblasti od vodičů

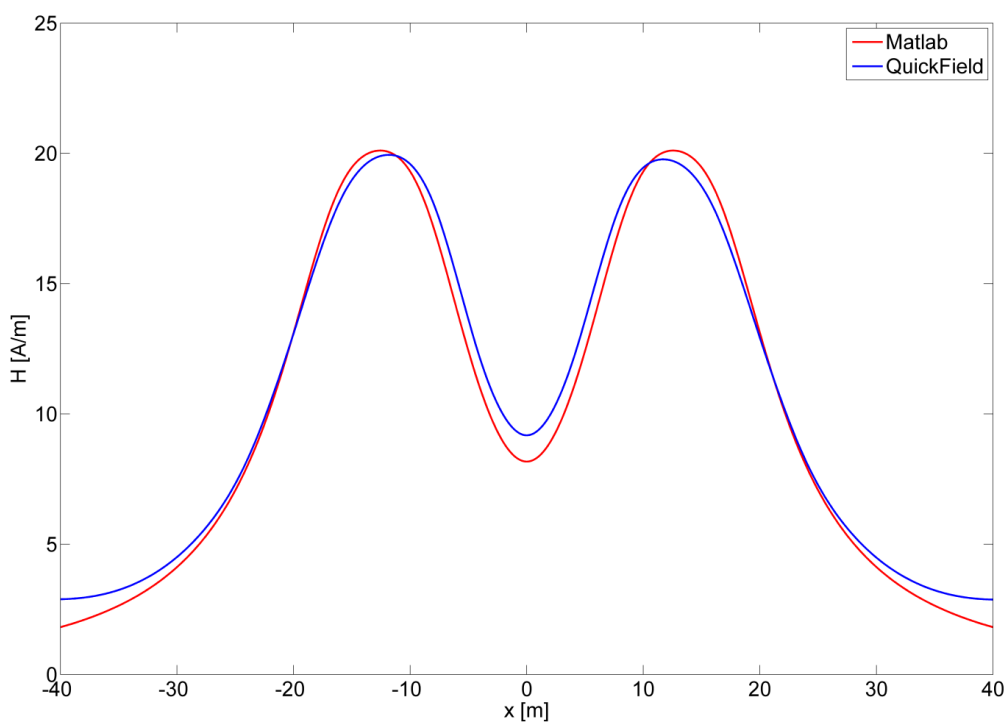
Při výpočtech byl počet uzlů sítě volen do 200 000. Dále bylo uvažováno, že relativní permeabilita země se shoduje s relativní permeabilitou vzduchu. Modelování magnetického pole bylo provedeno pro polohu minimální výšky vodičů nad zemí. Jednotlivé pozice vodičů byly totožné s pozicemi uvažovanými pro analytický výpočet.

Velikost amplitudy proudu se taktéž shodovala. Pro stožár Donau činila 790 A, pro stožár Dvojitý Portál 450 A a pro stožár Soudek 340 A.

Na základě výsledků získaných v kap. 6.4. jsem pro numerický výpočet zvolil takové konfigurace fází, které na daném stožáru vykazovaly nepříznivé rozložení intenzity magnetického pole. Pro stožár Donau se jedná o konfiguraci 6, pro Dvojitý Portál se jedná o konfiguraci 1 a u stožáru Soudek je to konfigurace 6.

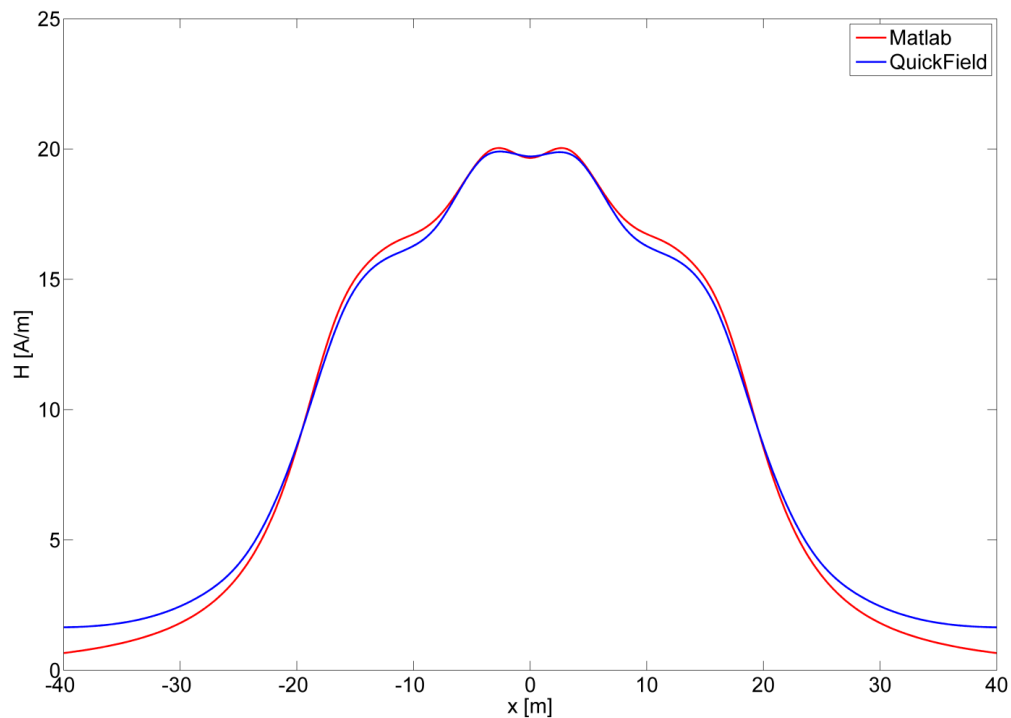
Z hodnot získaných numerickým výpočtem v QuickFieldu jsem vytvořil graf průběhu intenzity magnetického pole ve výšce 1,8 m nad zemí. V grafu je pro porovnání uvedena taktéž intenzita magnetického pole vypočtená analyticky v Matlabu.

a) Stožár Donau



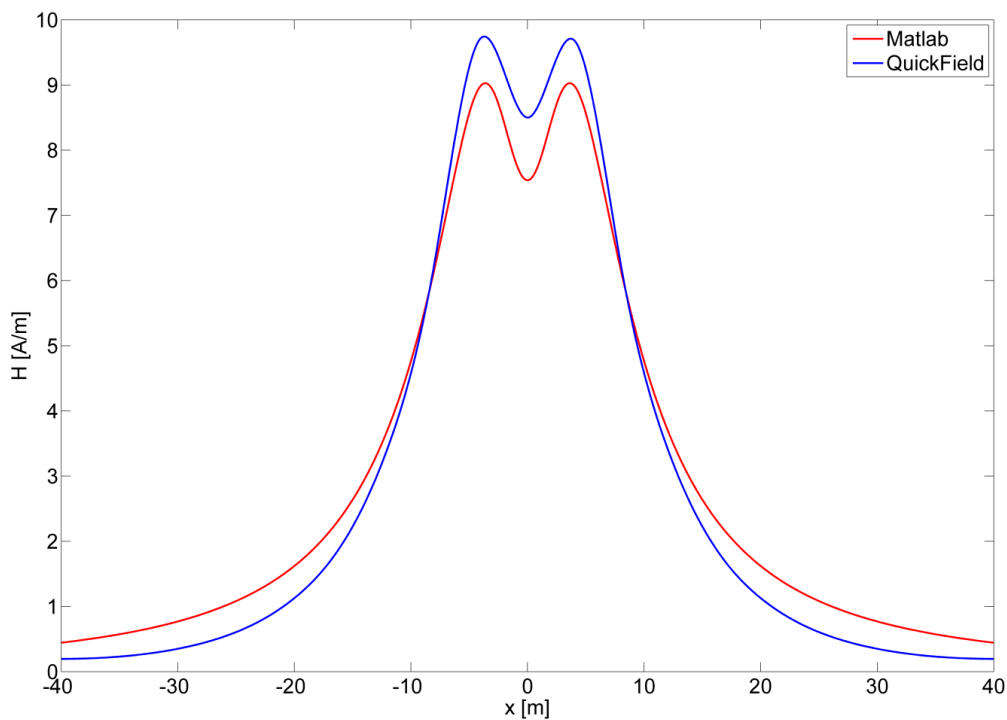
Obr. 7.2 Graf intenzity magnetického pole stožáru Donau získaný numerickým a analytickým výpočtem

b) Stožár Dvojitý Portál



Obr. 7.3 Graf intenzity magnetického pole stožáru Dvojitý Portál získaný numerickým a analytickým výpočtem

c) Stožár Soudek



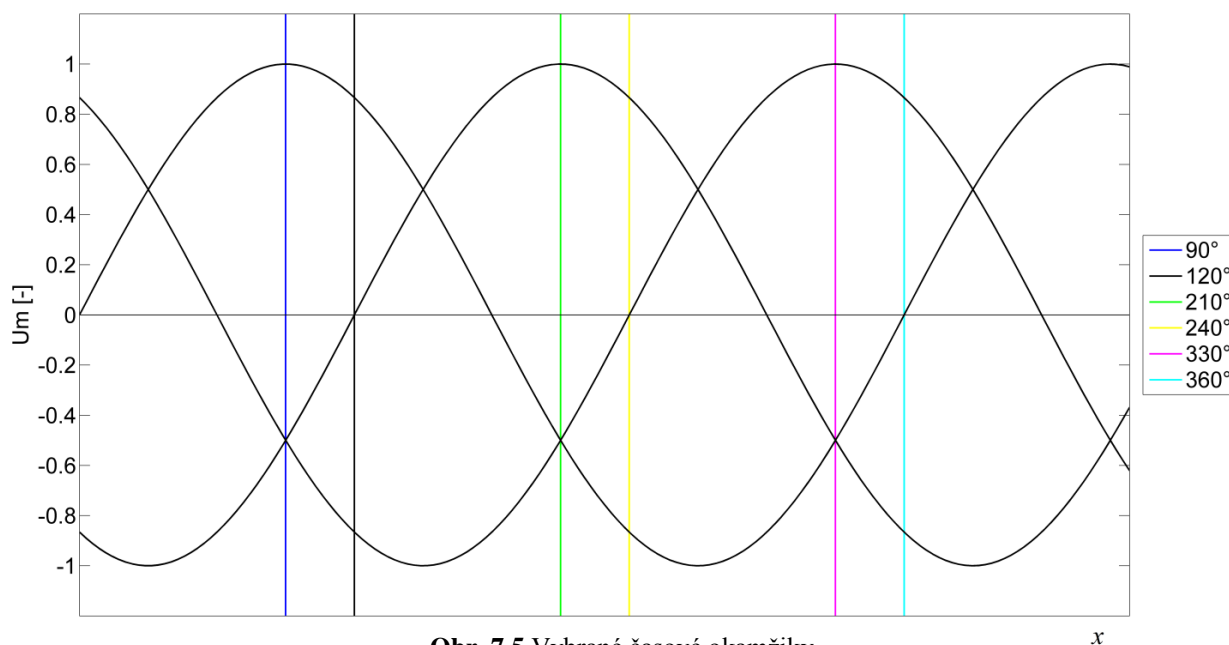
Obr. 7.4 Graf intenzity magnetického pole stožáru Soudek získaný numerickým a analytickým výpočtem

Průběh intenzity magnetického pole odpovídá výsledkům vypočteným analyticky podle postupu výpočtu [1] v Matlabu. Nejvíce se liší numericky vypočtená intenzita magnetického pole u stožáru Soudek. To může být způsobeno tím, že s ohledem na

prostorové rozmístění fázových vodičů stožáru Soudek vykazuje siločára z -ové složky vektorového magnetického potenciálu na spodní hranici oblasti největší zakřivení.

7.2. Modelování elektrického pole

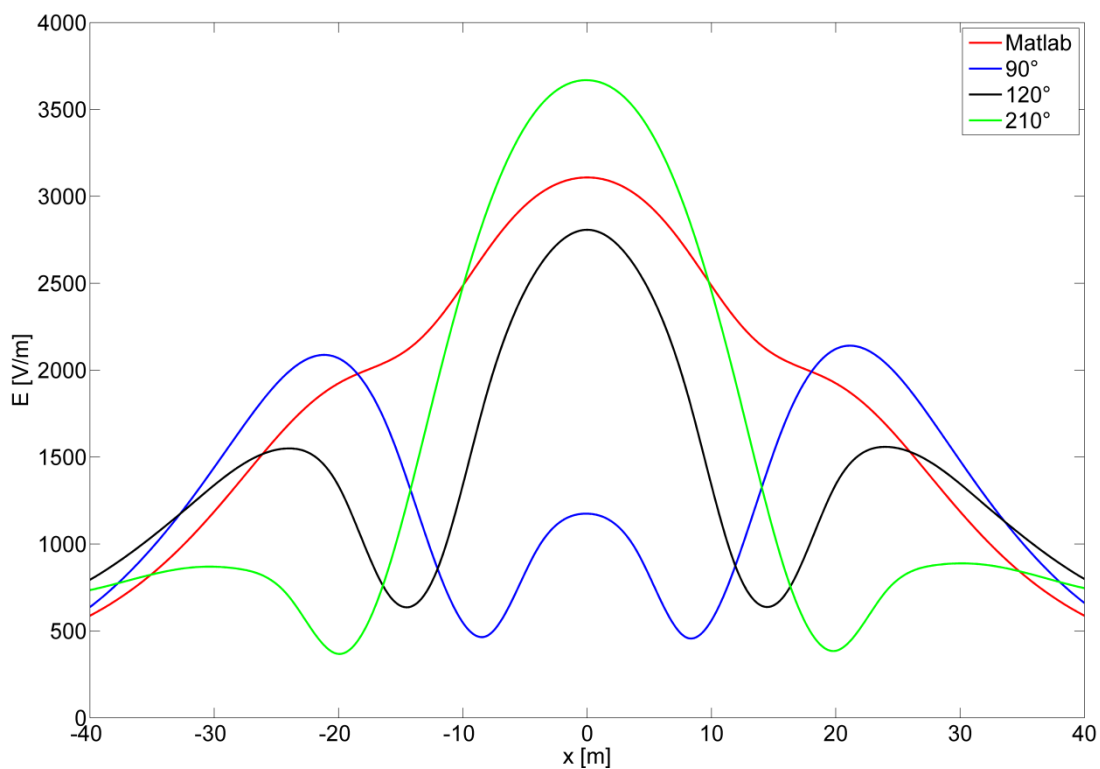
Použitý algoritmus uvedený v kap. 4.3. pro výpočet rozložení elektrického pole v okolí stožáru venkovního vedení umožňuje stanovit velikost elektrické intenzity s přihlédnutím k fázovému posuvu jednotlivých napětí, která se mění harmonicky. Program QuickField ovšem neumožňuje řešit úlohu s harmonickým průběhem napětí. Z tohoto důvodu je nutné jednotlivým vodičům přiřadit hodnotu napětí a řešit elektrostatické pole. Pro analyzování elektrického pole je zapotřebí výpočet opakovat, přičemž se vždy jednotlivým fázovým vodičům přiřadí napětí odpovídající specifickému časovému okamžiku. Konkrétně se jedná o 6 různých časových pozic během jedné periody, které jsou znázorněny na obrázku 7.5:



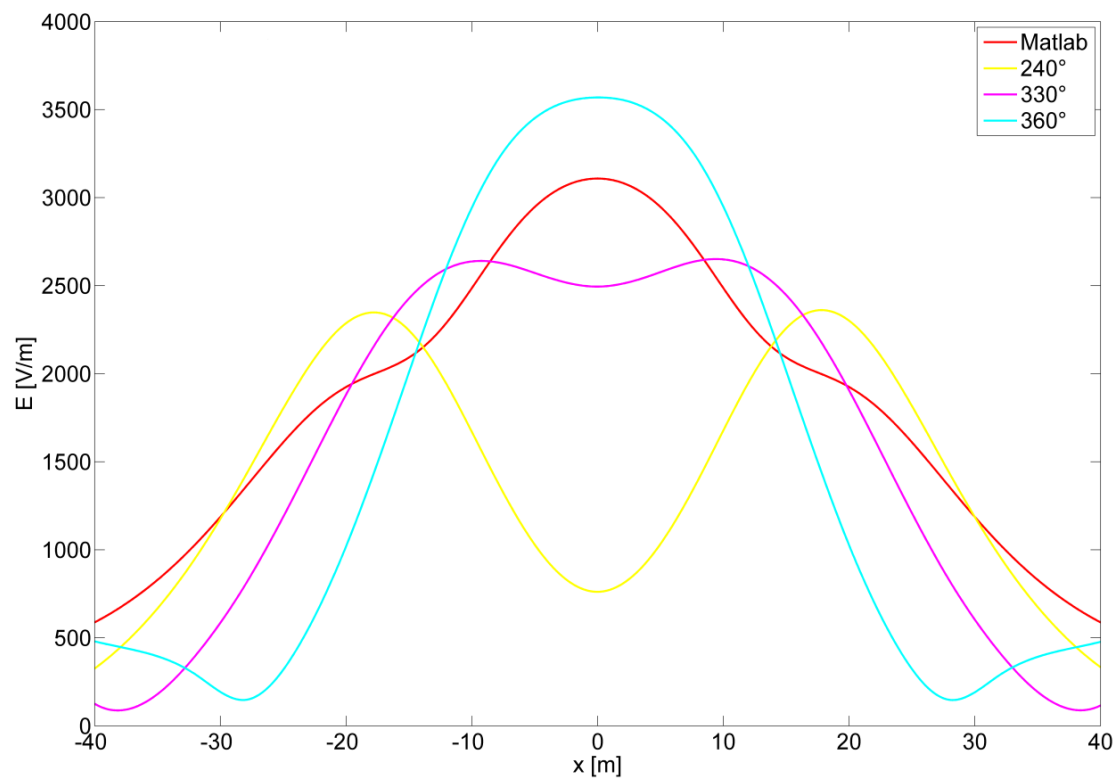
Obr. 7.5 Vybrané časové okamžiky

Modelování elektrického pole bylo provedeno pro polohu základní výšky vodičů nad zemí danou konstrukcí samotného stožáru. Jednotlivé pozice vodičů byly totožné s pozicemi uvažovanými pro analytický výpočet. Podle výsledků analytického výpočtu jsem pro numerický výpočet opět volil takové konfigurace fází, které na daném stožáru vykazovaly nepříznivé rozložení elektrické intenzity. Pro stožár Donau se jedná o konfiguraci 5, pro Dvojitý Portál se jedná o konfiguraci 1 a u stožáru Soudek je to konfigurace 6. Z hodnot získaných numerickým výpočtem jsem sestrojil grafy elektrické intenzity ve výšce 1,8 m nad zemí, které jsou opět doplněny elektrickou intenzitou vypočtenou analyticky v Matlabu.

a) Stožár Donau

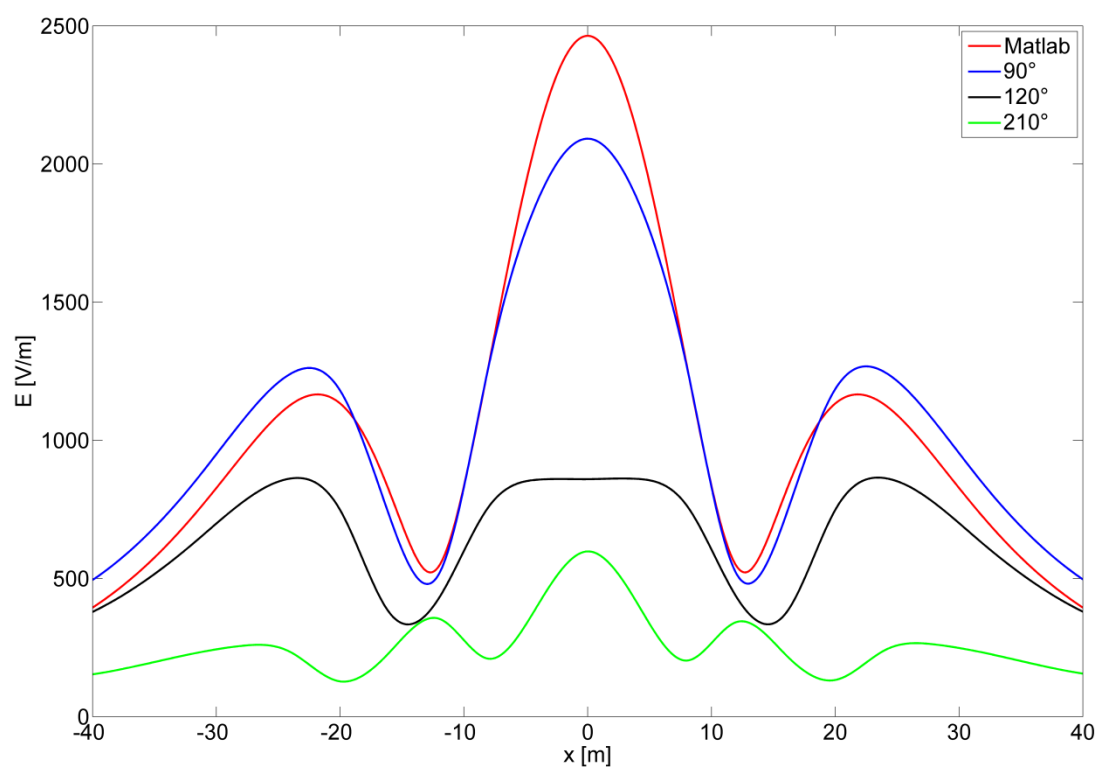


Obr. 7.6 Graf elektrické intenzity stožáru Donau vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky

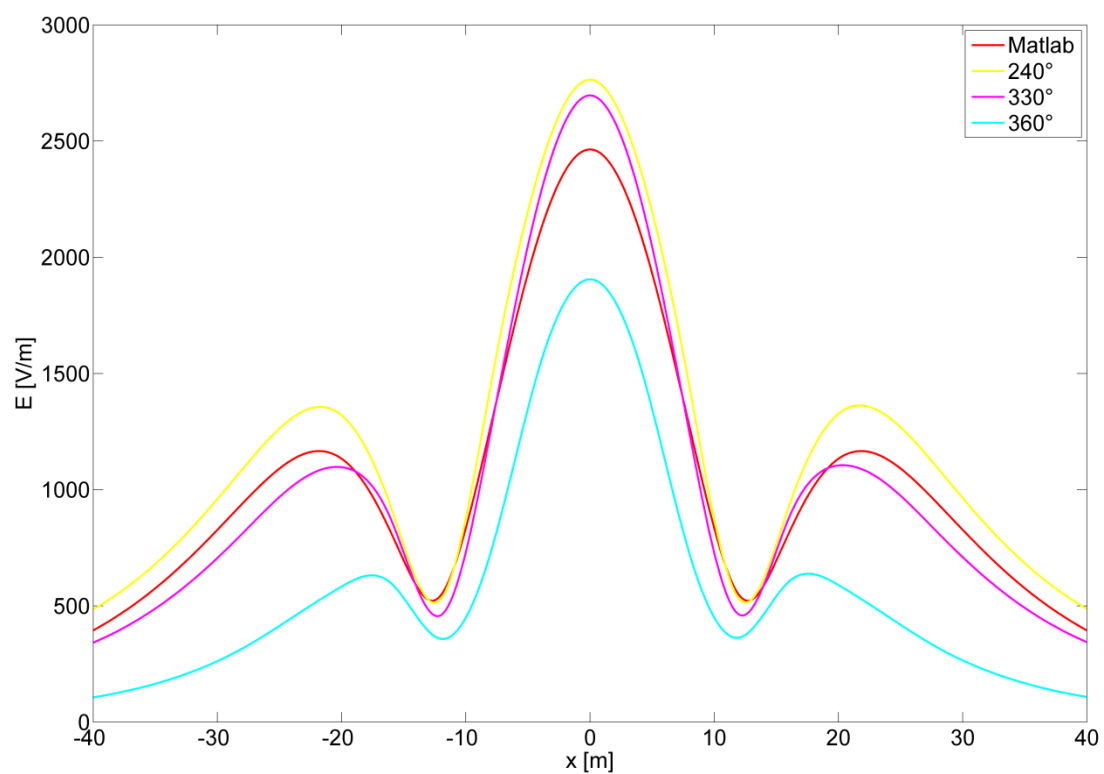


Obr. 7.7 Graf elektrické intenzity stožáru Donau vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky

b) Stožár Dvojitý Portál

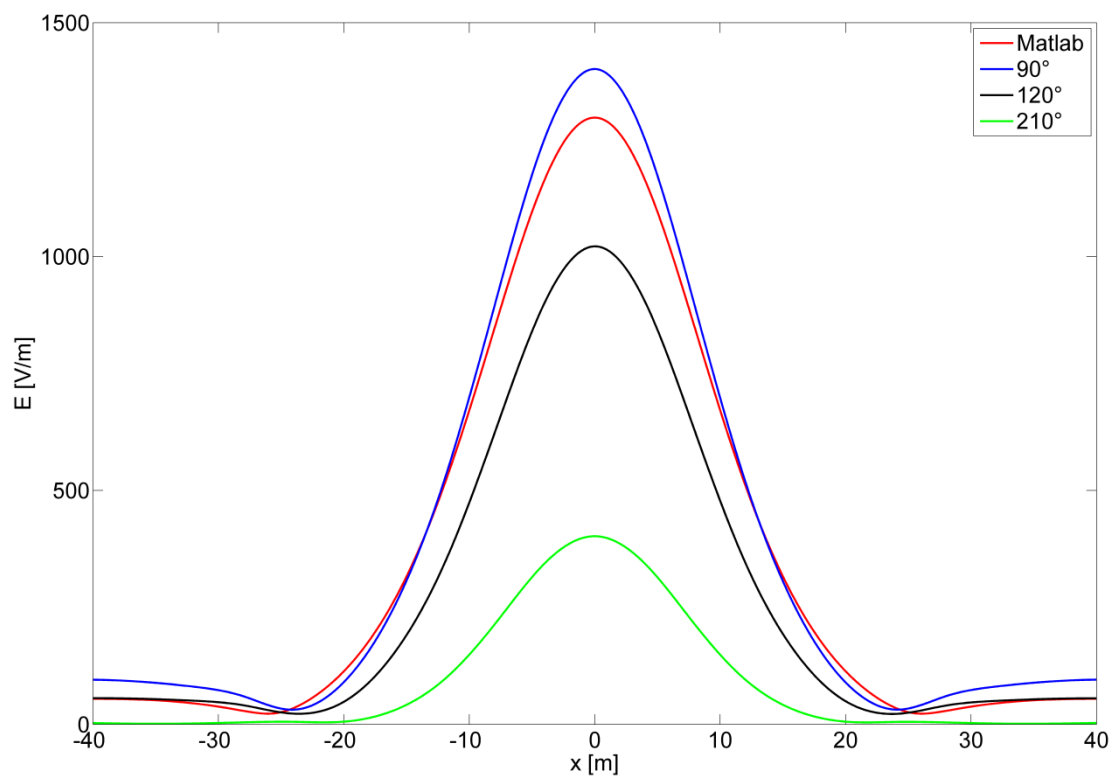


Obr. 7.8 Graf elektrické intenzity stožáru Dvojitý Portál vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky

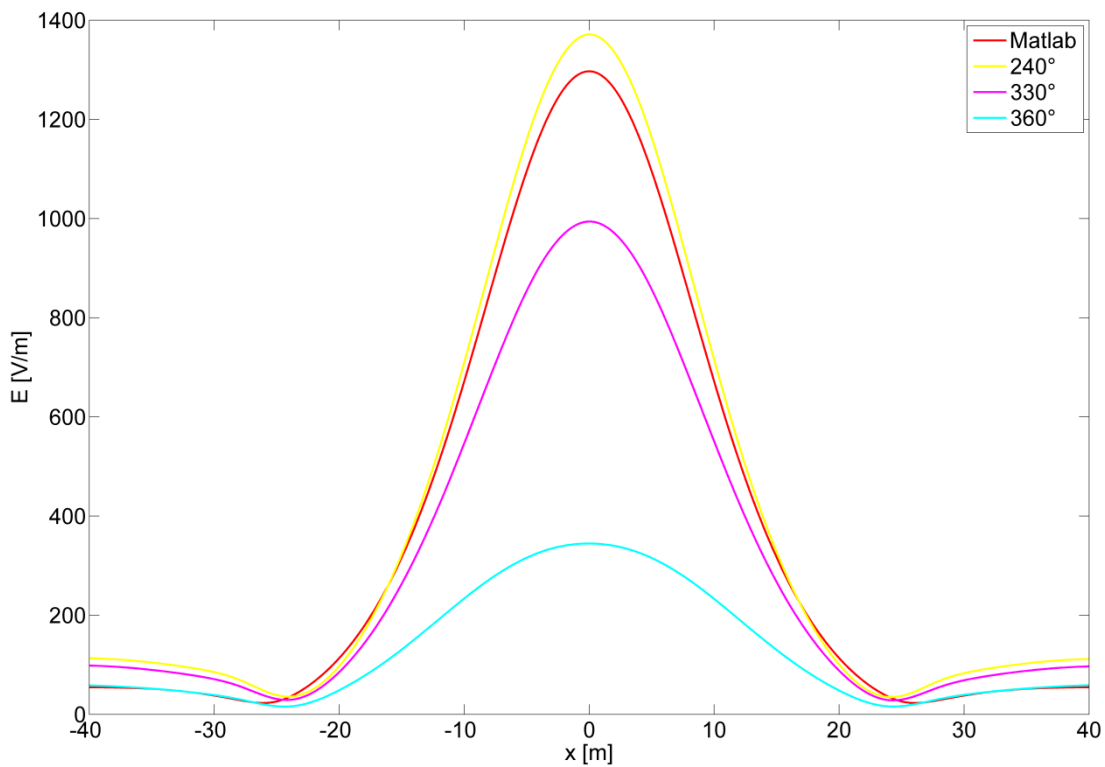


Obr. 7.9 Graf elektrické intenzity stožáru Dvojitý Portál vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky

c) Stožár Soudek



Obr. 7.10 Graf elektrické intenzity stožáru Soudek vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky



Obr. 7.11 Graf elektrické intenzity stožáru Soudek vypočtené analyticky a numericky pro určité časové okamžiky

Elektrická intenzita ve sledované oblasti mění v čase velikost a směr. Výsledkem analytického výpočtu je střední hodnota elektrické intenzity. Výsledkem numerického výpočtu provedeného pomocí programu QuickField je velikost elektrické intenzity v daném časovém okamžiku. V některých časech vymezených řezy dle obr. 7.5 dosáhla elektrická intenzita hodnot vyšších než hodnot získaných analytickým výpočtem. U stožáru Donau byl tento stav zjištěn pro úhel 210° a 360° , u stožáru Dvojitý Portál pro úhel 240° a 330° a u stožáru Soudek je to 90° a 240° .

8. Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval výpočtem rozložení elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení. Výpočet byl proveden pro tři stožáry dvojitých vedení, které patří mezi nejčastější stožáry v naší ES.

Vyšetření elektrického a magnetického pole jsem provedl analyticky a simulací v profesionálním programu. Při analytickém výpočtu bylo možno respektovat harmonické průběhy napětí a proudu a získat tak výsledné rozložení velikostí intenzit elektrického a magnetického pole.

Numerické modelování pomocí profesionálního programu představuje rychlý a efektivní nástroj k řešení magnetického pole. Modelování elektrického pole neumožňuje oproti analytickému výpočtu uvažovat harmonické napětí s fázovým posuvem jednotlivých fází, a proto bylo nutno provést opakovaný výpočet elektrostatického pole pro různé časové hladiny. Při vyšetřování magnetického pole byla největším úskalím volba hranice vyšetřované oblasti. Nesprávně zvolená hranice totiž může značně ovlivnit výsledky. Této problematice jsem se věnoval v kap. 7.1. a na základě provedených ověřovacích výpočtů jsem formuloval doporučení pro její volbu.

Vyšetření elektrického a magnetického pole bylo provedeno pro vodiče umístěné ve výšce dané typem stožáru a pro minimální výšku vodičů nad zemí. Ze získaných hodnot lze posoudit, zda mohou být v blízkosti vedení překročeny hygienické normy. Důležitým faktorem, který ovlivňuje rozložení elektrického a magnetického pole, je rozložení fází na jednotlivé vodiče. Proto jsem analyzoval všech 6 základních konfigurací. Na základě výpočtu je možno pro každý typ stožáru určit nejpříznivější a nejnepříznivější konfiguraci fází. Hodnoty jednotlivých konfigurací se mohou lišit až o 300 %. Symetrická rozmístění fází vykazují v případě stožárů Dvojitý Portál a Soudek nejnepříznivější rozložení intenzity elektrického a magnetického pole. U Stožáru Donau má symetrická konfigurace nejnepříznivější rozložení pouze u intenzity elektrického pole. Pro intenzitu magnetického pole je nejnepříznivější 6. konfigurace fází. Obecně platí, že konfigurace fází, které nemají u osy stožáru shodné fáze spodních vodičů, vykazují příznivější rozložení jak elektrického, tak i magnetického pole.

Normou stanovená dovolená hodnota intenzity elektrického pole 10 kV/m byla překročena pouze u stožáru Dvojitý Portál pro polohu minimální výšky u 1. a 3. konfigurace fází. Tyto dvě konfigurace mají umístěnou shodnou fázi u osy stožáru. Hodnota povolené magnetické indukce 0,5 mT nebyla dosažena v žádné konfiguraci fází ani u jednoho z uvažovaných stožárů. S ohledem na rozložení elektrického pole a možnosti jeho vzájemného vykompenzování se jeví jako nejvhodnější stožár pro přenos elektrické energie stožár Soudek.

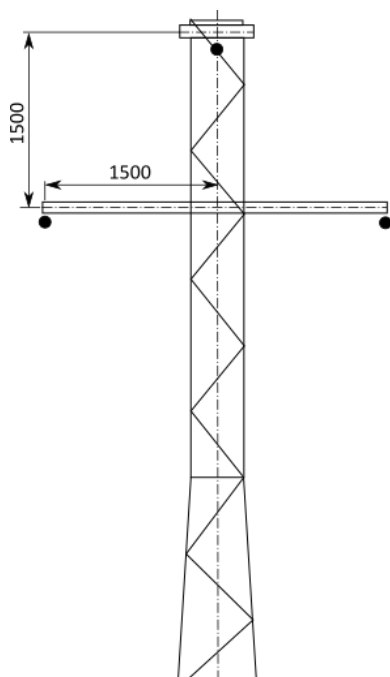
Použitá litereratura

- [1] Benešová, Z., Beran, M., Šroubová, L.: *Reduction of Electric and Magnetic Field of Double-Circuit Overhead Lines*, AMTEE 2003, Plzeň
- [2] Benešová, Z., Šroubová, L.: *Capacitive Coupling in Double-Circuit Transmission Lines*, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Žilina 2004
- [3] Mayer, D., Polák, J.: *Metody řešení elektrických a magnetických polí*, Praha: SNTL Praha 1983
- [4] Mertlová, J., Noháčová, L.: *Elektrické stanice a vedení*, Plzeň: ZČU v Plzni 2008
- [5] ČSN EN 50 341-1 *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV*
- [6] ČSN 33 2040 *Ochrana před účinky elektromagnetického pole 50 Hz v pásmu vlivu zařízení elektrizační soustavy*
- [7] Nařízení vlády č. 1/2008 Sb. *O ochraně zdraví před neionizujícím zářením*
- [8] *Provozní dokumentace vedení*, ČEPS a.s. – technická část
- [9] *Výstavba přenosové soustavy*. URL: <[http://www.ceps.cz/CZE/Media/Ke-stazeni/Documents/Publikace/Výstavba%20vedení%202011%20web.pdf](http://www.ceps.cz/CZE/Media/Ke-stazeni/Documents/Publikace/Vystavba%20vedeni%202011%20web.pdf)> dostupné 2.5.2012

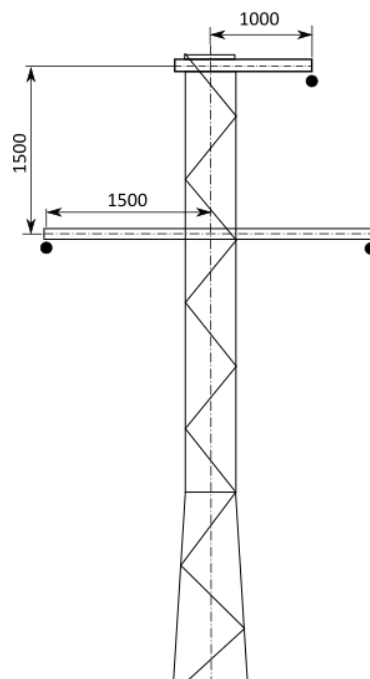
Příloha A

Příklady nejčastějších uspořádání fázových vodičů na stožárech venkovních vedení napět'ové hladiny 22 kV a 35 kV

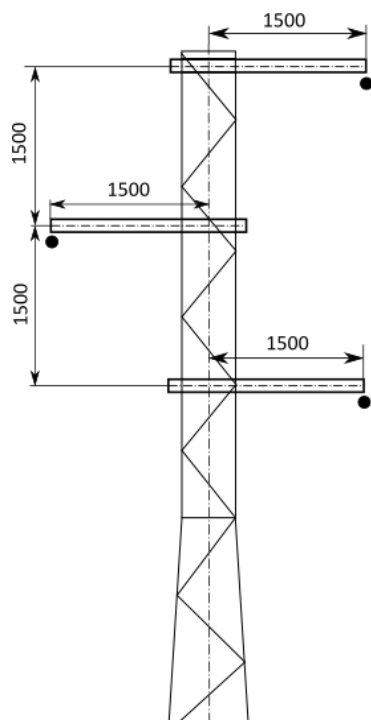
Jednoduchá vedení na ocelových příhradových stožárech:



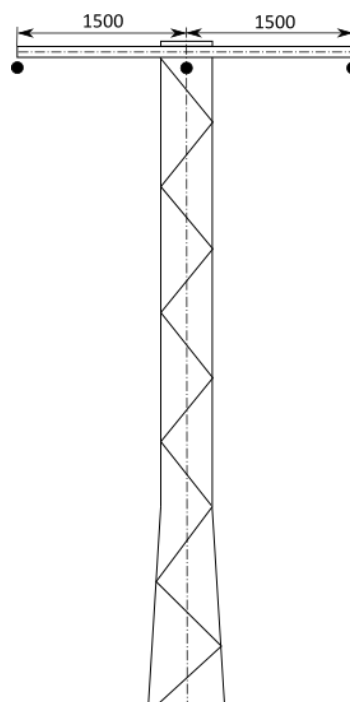
Obr. A.1 Uspořádání trojúhelník



Obr. A.2 Uspořádání vyosený trojúhelník

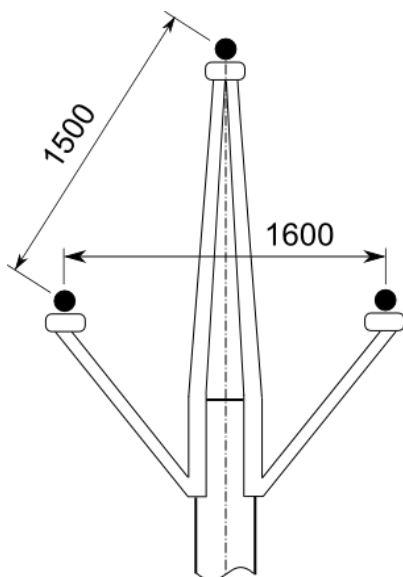


Obr. A.3 Uspořádání střídavé

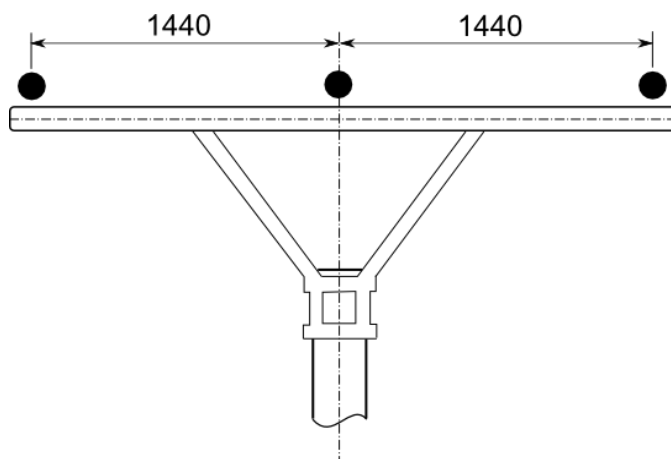


Obr. A.4 Uspořádání rovinné

Jednoduchá vedení na betonových a dřevěných sloupech:



Obr. A.5 Uspořádání trojúhelník



Obr. A.6 Uspořádání rovinné

Příloha B

Příklady nejčastějších stožárů jednoduchých venkovních vedení vvn a zvn



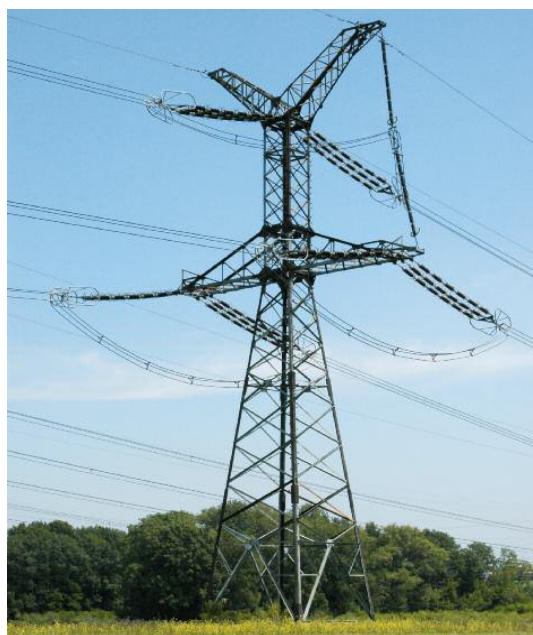
Obr. B.1 Nosný stožár Delta



Obr. B.2 Kotevní stožár Delta



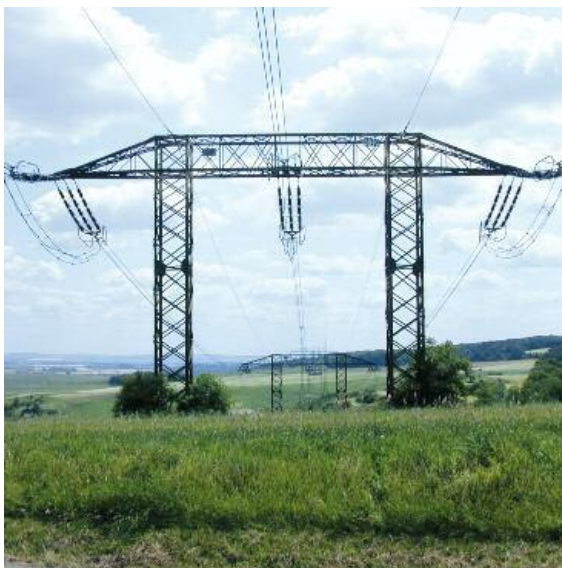
Obr. B.3 Nosný stožár Mačka



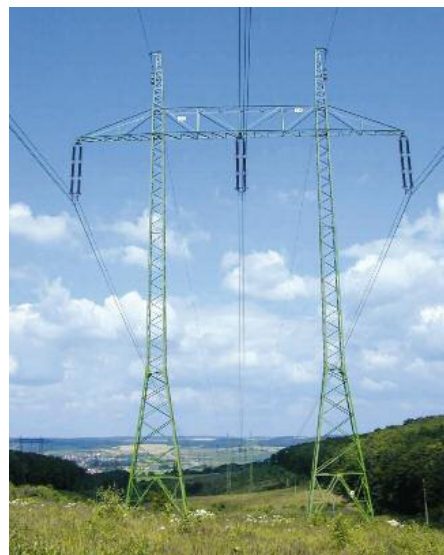
Obr. B.4 Kotevní stožár Mačka



Obr. B.5 Stožár Třídířík



Obr. B.6 Kotevní stožár Portál



Obr. B.7 Nosný stožár Portál