

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh řešení sdružených vedení přenosové  
a distribuční soustavy**

**Martin Kononov**

**Plzeň 2015**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin KONONOV**  
Osobní číslo: **E12B0029P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Návrh řešení sdružených vedení přenosové a distribuční soustavy**  
Zadávací 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 :

Posouzení realizace sdružených vedení pro přenosovou a distribuční soustavu.

1. Popište základní stožárové konstrukce přenosové a distribuční soustavy s ohledem na napěťové hladiny.
2. Uveďte přehled používaných variant sdružených vedení ve světě.
3. Proveďte výpočet vzájemného ovlivňování vedení a rozložení elektromagnetického pole v okolí vedení, porovnejte s výsledky získanými simulací ve vhodném SW pro různé varianty.
4. Na základě dosažených výsledků navrhnete varianty využitelné v přenosové soustavě ČR.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Podklady od ČEPS (konstrukce stožárů ap.)
2. Mayer D.: Vybrané partie ze silnoproudé elektrotechniky, skripta ZČU, 2002
3. Mayer, D., Benešová, Z.: Algorithm for computation of inductances of various three-phase lines. Acta Technica IEE CSAV, 2004, vol.49, No.1, pp.1-30, ISSN 0001-7043
4. Benešová Z., Šroubová L.: Capacitive coupling in double-circuit transmission lines - sborník 5. mezinárodní konference ELEKTRO 2004. Žilina, Slovenská republika: Elektrotechnická fakulta, ŽU Žilina. 2004.

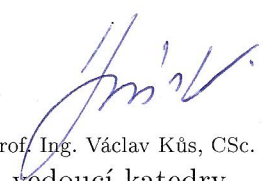
Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc.**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na vyšetření elektromagnetického pole v okolí sdružených vedení. V práci jsou popsány možné varianty sdruženého vedení a nevhodnější tvary stožárových konstrukcí. Na základě popsaného postupu je proveden analytický výpočet intenzity elektrického a magnetického pole. Výsledky analytického výpočtu jsou porovnány s numerickým výpočtem.

## **Klíčová slova**

Sdružené vedení, stožár venkovního vedení, hygienické normy, výpočet intenzity magnetického pole, výpočet intenzity elektrického pole, konfigurace fází

## **Abstract**

*Kononov, Martin. Design of coupled transmission and distribution lines [Návrh řešení sdružených vedení přenosové a distribuční soustavy]. Pilsen, 2015. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia, Faculty of electrical engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc.*

The Bachelor's thesis is focused on analysis of electric and magnetic field in the vicinity of overhead coupled transmission and distribution lines. In the thesis there are described five variations of coupled transmission and distribution lines and most suitable types of transmission towers. According to the described method the calculation of electric and magnetic field intensity is carried out. These results are compared with numerical calculation.

## **Key words**

Multicircuit transmission lines, quadruple transmission tower, safety standards, calculation of electric field intensity, calculation of magnetic field intensity, 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 4. 6. 2015

.....

Martin Kononov

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Prof. Ing. Zdeňce Benešové, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Zároveň bych chtěl poděkovat Ing. Tomášovi Nazarčíkovi za pomoc při výpočtech. V neposlední řadě bych také rád poděkoval svým rodičům za trpělivost a podporu ve studiu.

## Obsah

1	Úvod .....	2
2	Stožáry venkovního vedení .....	3
2.1	Napět'ové hladiny .....	3
2.1.1	Přenosová soustava .....	3
2.1.2	Distribuční soustava .....	4
2.2	Stožárové konstrukce používané v PS.....	4
2.2.1	Tvar a základní popis stožárové konstrukce Donau.....	4
2.2.2	Tvar a základní popis stožárové konstrukce Soudek .....	6
2.3	Sdružená vedení.....	7
2.3.1	Technické řešení sdružených vedení.....	7
2.3.2	Sdružená vedení ve světě .....	7
2.3.3	Navržené varianty sdružených vedení .....	8
2.3.3.1	Sdružené vedení s vedením DS na jedné a PS na druhé straně stožáru .....	8
2.3.3.2	Sdružené vedení s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce .....	9
2.3.3.3	Sdružené vedení s vedením PS nad vedením DS .....	10
3	Základní principy řešení elektrického pole .....	11
3.1	Výpočet nábojů a kapacit v M-vodičovém systému.....	11
3.2	Výpočet nábojů a kapacit v M-vodičovém systému se zemnicími lany .....	12
3.3	Výpočet intenzity elektrického pole.....	14
4	Základní principy řešení magnetického pole .....	16
5	Analytický výpočet rozložení elektromagnetického pole .....	18
5.1	Výpočet intenzity elektrického pole.....	20
5.1.1	Stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně stožáru .....	20
5.1.2	Stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce .....	21
5.1.3	Stožár Donau s vedením PS nad vedením DS .....	22
5.1.4	Stožár D-type s vedením PS nad vedením DS.....	23
5.1.5	Stožár Vertical s vedením PS nad vedením DS .....	24
5.1.6	Porovnání elektrických polí stožárů D-type a Vertical 4x400 kV .....	25
5.2	Výpočet intenzity magnetického pole .....	26
5.2.1	Stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně stožáru .....	26
5.2.2	Stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce .....	27
5.2.3	Stožár Donau s vedením PS nad vedením DS .....	28



5.2.4	Stožár D-type s vedením PS nad vedením DS .....	29
5.2.5	Stožár Vertical s vedením PS nad vedením DS .....	30
5.2.6	Porovnání magnetických polí stožárů D-type a Vertical 4x400 kV .....	31
6	Numerický výpočet rozložení elektromagnetického pole .....	32
6.1	Simulace rozložení elektrického pole.....	32
6.2	Simulace rozložení magnetického pole .....	36
7	Závěr.....	40
	Seznam literatury a informačních zdrojů.....	42
	Přílohy.....	44

**Seznam symbolů a zkratk**

PS .....	přenosová soustava
ENTSO-E.....	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny
DS .....	distribuční soustava
SDV .....	sdružené vedení
OPV .....	ochranné pásmo vedení
$E$ ( $V \cdot m^{-1}$ ).....	fázor intenzity elektrického pole
$Q$ (C) .....	elektrický náboj
$\varphi$ (V).....	elektrický potenciál
$A$ .....	matice potenciálových koeficientů
$\alpha_{ii}$ ( $V \cdot C^{-1}$ ).....	vlastní potenciálový koeficient
$\alpha_{ij}$ ( $V \cdot C^{-1}$ ).....	vzájemný potenciálový koeficient
$B$ .....	matice kapacitních koeficientů
$\beta_{ii}$ ( $F \cdot m^{-1}$ ) .....	koeficient elektrostatické kapacity vodiče na jednotku délky
$\beta_{ij}$ ( $F \cdot m^{-1}$ ) .....	koeficient elektrostatické indukce vodiče $i$ na vodič $j$
$H$ ( $A \cdot m^{-1}$ ) .....	fázor intenzity magnetického pole
$B$ (T).....	magnetická indukce
$A$ ( $Wb \cdot m^{-1}$ ) .....	vektorový magnetický potenciál

## **1 Úvod**

V dnešní době neustále rostou požadavky na přenos elektrické energie. Tyto požadavky jsou dány zejména neustále se zvyšující spotřebou elektrické energie, ale také transportem vyšších výkonů přes území ČR. Protože provozovatel přenosové soustavy je povinen zajišťovat spolehlivé provozování a rozvoj elektroenergetické soustavy, je nucen v souvislosti se zmiňovanými rostoucími požadavky na přenos stavět nová nebo přezbrojovat již existující venkovní vedení. Z důvodu omezených prostorových možností pro výstavbu nových koridorů vedení přenosové soustavy se začalo uvažovat o výstavbě tzv. sdružených vedení.

Jako sdružená vedení [1] označujeme vedení, u nichž je stožárová konstrukce využívána zároveň pro vedení přenosové a distribuční soustavy. V ČR mají obě soustavy různé vlastníky, resp. provozovatele. Z tohoto důvodu je problematika sdruženého vedení poměrně komplikovaná a její kompletní řešení vyžaduje pozornost i jiných než elektrotechnických oborů (majetkoprávní vztahy, speciální stožárové konstrukce). Tato práce je ale zaměřena pouze na problematiku týkající se elektrotechniky.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout možná řešení sdružených vedení přenosové a distribuční soustavy, provést výpočet rozložení elektromagnetických polí v jejich okolí a na základě výsledků určit pomocí technických norem reálné varianty pro užití v přenosové soustavě.

## 2 Stožáry venkovního vedení

### 2.1 Napěťové hladiny

Elektrotechnické normy a předpisy dělí elektrické napětí podle velikosti dle následující tabulky.

Tab. 1: Napěťové hladiny

Název	Zkratka	Velikost napětí
malé napětí	MN	do 50 V
nízké napětí	NN	50 V ÷ 1000 V
vysoké napětí	VN	1 kV ÷ 52 kV
velmi vysoké napětí	VVN	52 kV ÷ 300 kV
zvláště vysoké napětí	ZVN	300 kV ÷ 800 kV
ultra vysoké napětí	UVN	více než 800 kV

#### 2.1.1 Přenosová soustava

Přenosová soustava [2] (dále jen „PS“), často nazývána „páteří“, slouží k přenosu elektrické energie od zdroje (výroby) k soustavě distribuční popřípadě k jiné přenosové soustavě. Přenosová soustava ČR je v rámci celé Evropy propojena s přenosovými soustavami okolních států a tvoří tak evropskou přenosovou soustavu ENTSO-E. Linky PS jsou provozovány na hladině velmi vysokého napětí (110 kV a 220 kV) a zvláště vysokého napětí (400 kV). V 1. polovině minulého století byl přenos elektrické energie realizován na hladině 110 kV. Postupem času byly kladeny větší nároky na přenosovou schopnost linek a postupně se přezbrojovalo na vyšší napěťové hladiny. Většina linek 110 kV byla převedena pod správu distribučních soustav. Výjimku tvoří pouze linky 110kV, které jsou provozovány jako RNVS jaderné elektrárny Temelín a patří do správy PS ČR. V současnosti trasy PS tvoří hlavně vedení 400 kV. Trasy 220 kV dnes plní převážně úlohu záložních a doplňkových vedení. Celá soustava je provozována s přímo uzemněným uzlem. V České republice je provozovatelem PS společnost ČEPS, a. s.

### 2.1.2 Distribuční soustava

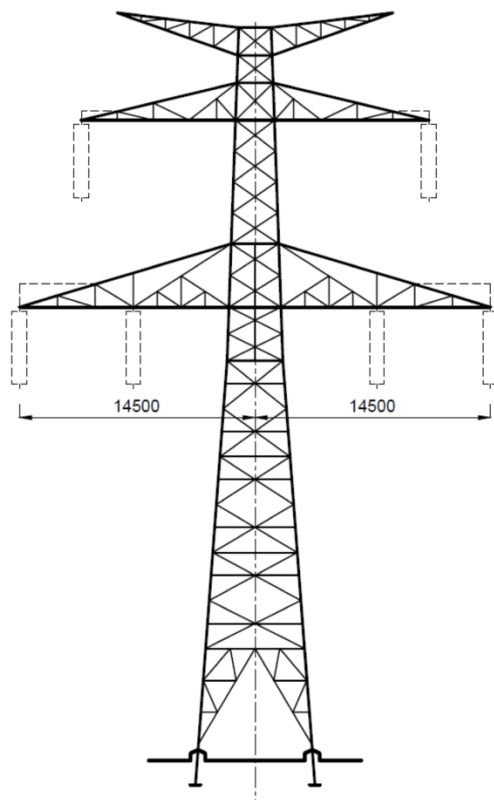
Distribuční soustava (dále jen „DS“) je provozována převážně na napěťových hladinách nízkého napětí (0,4 kV), vysokého (22 kV a 35 kV) a velmi vysokého (110 kV). Vedení 0,4 kV a 110 kV jsou provozována s přímo uzemněným uzlem na rozdíl od vedení 22 kV a 35 kV, která se provozují s nepřímo uzemněným uzlem přes tlumivku. V ČR jsou hlavními provozovateli DS společnosti ČEZ distribuce, a. s., E-ON distribuce, a. s. a PRE Pražská energetika, a. s.

## 2.2 Stožárové konstrukce používané v PS

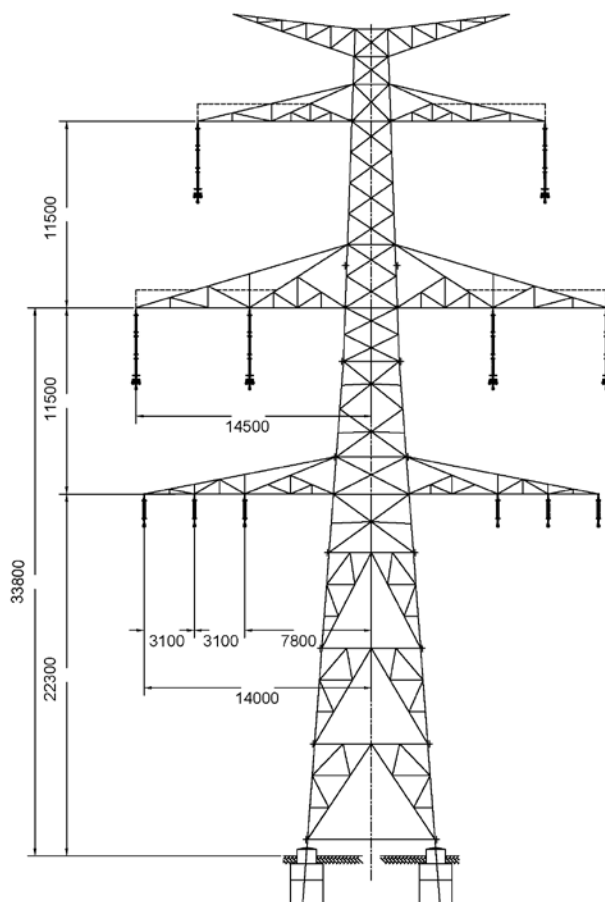
Stožáry [3] plní nosnou funkci a zároveň zajišťují fyzické oddělení jednotlivých fází vedení. Vzhledem k vysokému přenášenému výkonu jsou v PS používány stožáry vyšší a mohutnější než v DS. V praxi se setkáme s mnoha typy a tvary stožárů, jejichž parametry jsou převážně ovlivňovány požadavky na pevnost a životnost. Rozměry ocelových konstrukcí jsou navrhovány podle trasy vedení, klimatických a povětrnostních podmínek a zvolené napěťové hladiny. Jednotlivé tvary stožárů mají různá uspořádání fázových vodičů a zemnicích lan, a proto se i rozložení elektromagnetického pole v okolí vedení liší. Mezi nejčastěji používané stožárové konstrukce patří konstrukce tvaru Portál, Soudek, Kočka, a Donau. Protože provozovatel PS [1] plánuje do budoucna zdvojení všech stávajících jednoduchých linek, je tato práce zaměřena pouze na stožáry tvaru Donau a Soudek, které jsou určeny pro vícenásobné vedení.

### 2.2.1 Tvar a základní popis stožárové konstrukce Donau

Základní konstrukci stožáru Donau tvoří dvě konzoly, na kterých jsou uspořádány fázové vodiče do rovnostranného trojúhelníka. Z tohoto důvodu je Donau vhodný pro horizontální členění fázových vodičů. Vzhledem k tomu, že se tento stožár používá pouze na hladině VVN, je jeho konstrukce vždy doplněna o dvě zemnicí lana. Pro konstrukci SDV se využívají speciální stožáry doplněné o další konzoly pro DS.



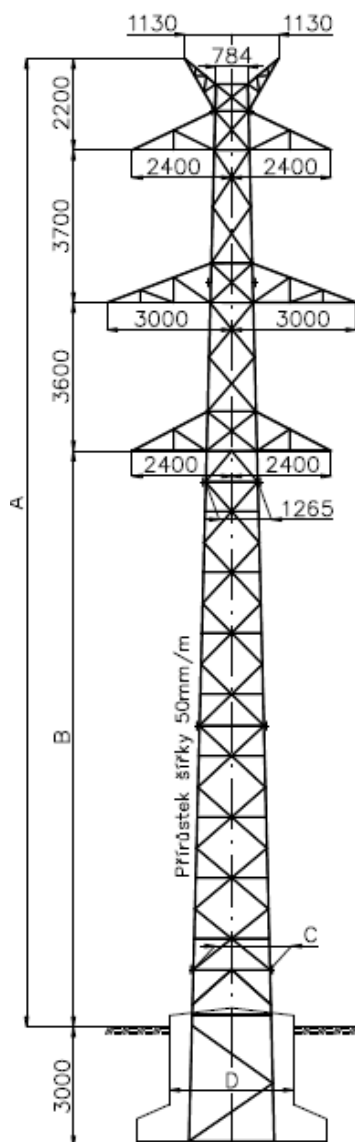
Obr. 1: Donau 2x400 kV [1]



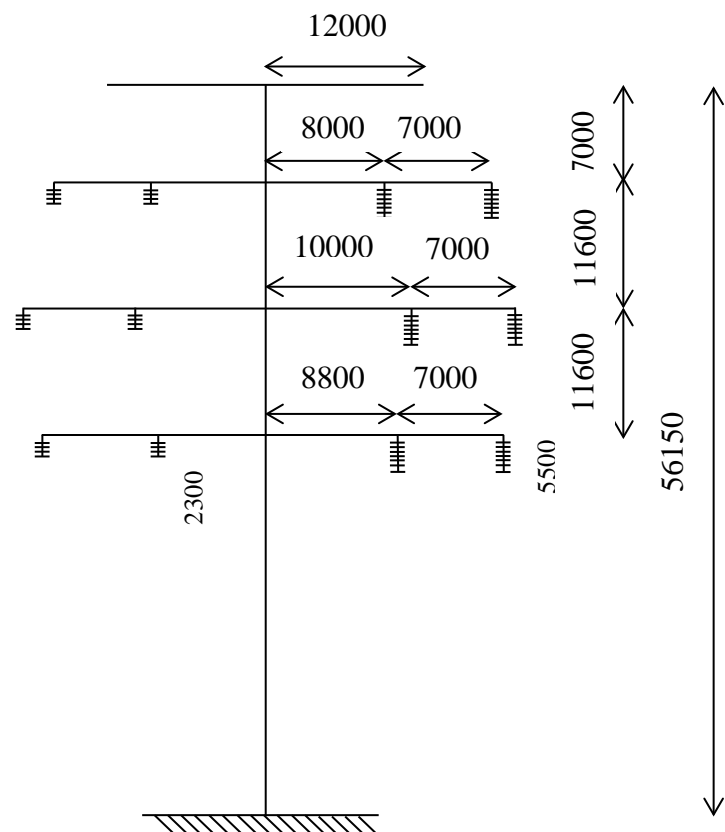
Obr. 2: Donau pro SDV (N 2x400 kV a 2x110 kV) [1]

### 2.2.2 Tvar a základní popis stožárové konstrukce Soudek

Konstrukce stožáru Soudek je stejně jako většina stožárů VVN a ZVN konstruována jako příhradová čtyřboká konstrukce z oceli. Konstrukce se používá jak na napěťové hladině VVN (110 kV s jedním zemnicím lanem), tak i na napěťové hladině ZVN (400 kV s dvěma zemnicími lany). V případě kotevního stožáru je dřívík rozkročen. Z hlediska SDV je stožár typu Soudek vhodný pro vertikální členění fázových vodičů PS a DS.



Obr. 4: Soudek 2x110 kV [3]



Obr. 3: Soudek pro SDV (2x400 kV a 2x110 kV) [1]

## 2.3 Sdružená vedení

### 2.3.1 Technické řešení sdružených vedení

Z hlediska vzájemného uspořádání vodičů DS a PS lze uspořádání sdruženého vedení rozdělit na vertikální (vodiče jednotlivých soustav jsou vedle sebe) a horizontální (vodiče soustav jsou nad sebou). Při návrhu uspořádání SDV [1] musíme respektovat vlastnosti a důležitost PS. Vedení PS je oproti vedení DS mnohem důležitější, a proto by mělo být umístěno na stožáru tak, aby nemohlo být poškozeno druhým vedením. Pokud bude uvažován pád vodiče z důvodu poruchy izolátorového závěsu nebo spojovací armatury, je z hlediska bezpečnosti PS vhodné umístit vodiče DS vždy pod (horizontální řešení) nebo vedle (vertikální řešení) vodičů PS. To je zároveň výhodné s přihlédnutím na častější údržbu vedení distribuční soustavy. Z důvodu rozdílné hmotnosti fázových vodičů vedení PS a DS, musí být pro vertikální řešení SDV vyložení vodičů vedení PS blíže k dřívku, aby nedocházelo k jednostrannému zatížení stožárové konstrukce. V případě horizontálního řešení je zase nutné počítat s vyšší výškou celého stožáru a tím i s požadavky na větší pevnost konstrukce.

### 2.3.2 Sdružená vedení ve světě

Omezování při zřizování nových energetických koridorů, rostoucí ceny náhrad za omezení vlastnického práva k pozemkům a další zejména legislativní důvody vedou ke spojování koridorů a výstavbě sdružených vedení v různých zemích světa [4 - 7]. V mnoha státech tedy již existují stožáry pro většinou čtyřnásobné vedení stejných nebo různých napěťových hladin, frekvencí či dokonce hybridní SDV pro střídavé a stejnosměrné vedení. Sdružená vedení, která kombinují dvě napěťové hladiny přenosové soustavy, jsou pravděpodobně nejvíce rozšířena v Číně [4, 5], kde se této problematice věnují již řadu let. Nejčastější kombinací napěťových hladin pro čínské SDV je 2x500 kV a 2x220 kV. Vzhledem ke složité konstrukci stožárů a tím nepříznivému rozložení elektromagnetického pole zde existuje hned několik variant stožárů. Každá varianta má své výhody a nevýhody. Posuzuje se nejen celková výška ocelové konstrukce, ale také např. šířka ochranného pásma. Naproti tomu v sousedním Německu již existuje SDV se stožárem Donau se spodní konzolí pro nižší napěťovou hladinu (obr. 2). Dále zde existují stožáry SDV pro vedení o různých frekvencích (380 kV pro 50 Hz a 110 kV pro 16,7 Hz). Do budoucna se v Německu také plánuje výstavba SDV [1] pro dvě napěťové hladiny (4x400 kV a 2x110 kV), které bude propojovat sever a jih země. Veškeré zmiňované konstrukce jsou uvedeny v příloze A.

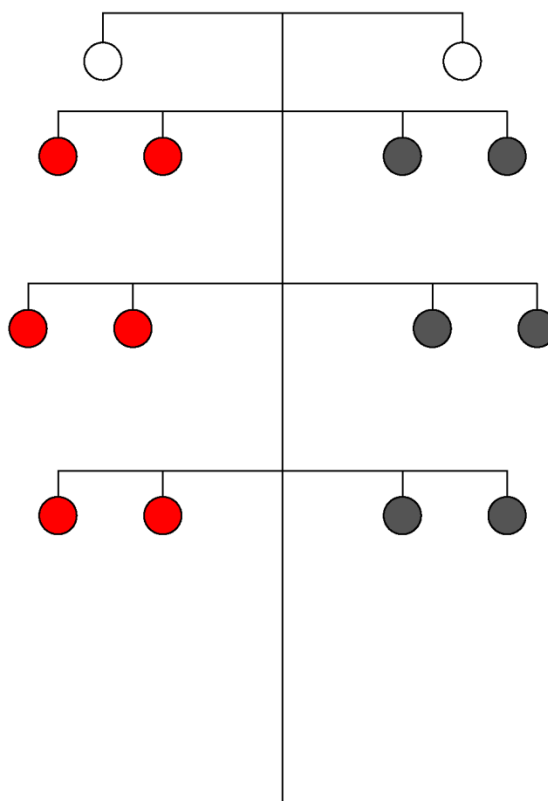


### 2.3.3 Navržené varianty sdružených vedení

Na základě podkladů od ČEPS a. s. a používaných stožárových konstrukcí ve světě [4, 5] bylo pro výpočet rozložení elektromagnetického pole vybráno pět variant vhodných pro SDV. Černě je znázorněno vedení PS, červeně vedení DS a bílé zemnicí lana. Níže znázorněné varianty SDV mají svá specifika, která se dají dále rozdělit do třech podskupin.

#### 2.3.3.1 Sdružené vedení s vedením DS na jedné a PS na druhé straně stožáru

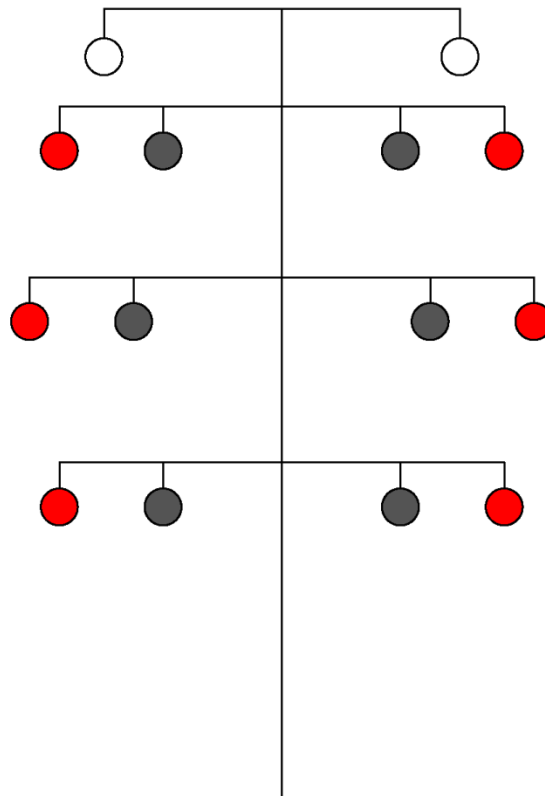
Varianta je vhodná z hlediska práce na vedení, kdy práce na jedné straně nemá vliv na provoz vedení druhé soustavy. Zároveň je tato varianta přímo aplikovatelná na již postavené dvojité vedení, kde se dlouhodobě jeden potah nevyužívá. Z hlediska majetkoprávních vztahů by mohly nastat komplikace z důvodu ochranného pásma vedení („OPV“). Při tomto uspořádání je OPV na straně PS větší než na straně DS [1].



Obr. 5: Sdružené vedení s vedením DS na jedné a PS na druhé straně stožáru

### 2.3.3.2 Sdružené vedení s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce

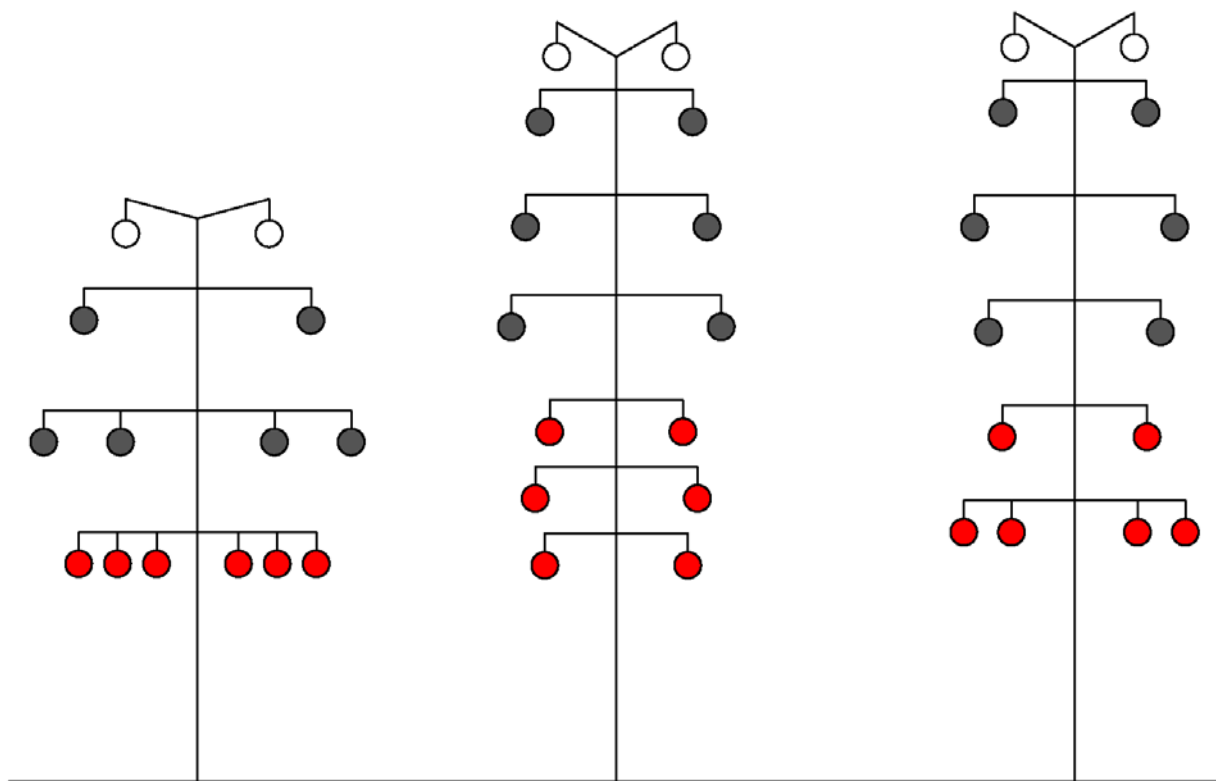
Při pracích na vedení by bylo nutné omezit provoz druhého vedení, což je nevýhodné. Výhodou této varianty je užší stožárová konstrukce z důvodu umístění fázových lan v blízkosti dřívku stožáru a s tím spojené i užší ochranné pásmo vedení, které je na obou stranách stejně široké (OPV PS na obou stranách přesahuje OPV DS) [1].



Obr. 6: Sdružené vedení s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce

### 2.3.3.3 Sdružené vedení s vedením PS nad vedením DS

Práce na vedení ve spodní části neovlivňuje provoz vedení PS. U stožárové konstrukce Donau (na obr. 7 vlevo) by při práci na vedení PS bylo nutné omezit provoz vedení DS, což lze k důležitosti PS akceptovat. V případě dalších dvou konstrukcí nepřináší práce na jednom z vedení žádné komplikace, protože není potřeba omezovat provoz druhého vedení. Nevýhodou z hlediska konstrukčního je u těchto variant značná výška (téměř 80 m). Naopak pro rozložení elektromagnetického pole v blízkosti země je výška stožáru výhodná. Další omezení mohou vznikat v případě poruch vedení PS, kdy případná porucha může poškodit vedení DS (pád fázového vodiče a následné spojení s nižší napěťovou hladinou). Ochranné pásmo vedení PS na obou stranách přesahuje ochranné pásmo vedení DS. I přes určité nevýhody přináší toto uspořádání jistý kompromis mezi navrženými variantami [1, 4, 5].



Obr. 7: Sdružené vedení s vedení PS nad vedením DS

### 3 Základní principy řešení elektrického pole

Aby bylo možné vypočítat intenzitu elektrického pole, je potřeba znát náboje jednotlivých vodičů. Náboje lze vypočítat za předpokladu, že je známo napětí jednotlivých vodičů a jejich uspořádání v prostoru. Pomocí metody zrcadlení [8] lze určit základní vztahy mezi náboji a potenciály.

#### 3.1 Výpočet nábojů a kapacit v M-vodičovém systému

Vztah mezi napětím a náboji [9] jednotlivých vodičů lze popsat pomocí potenciálových  $\alpha_{ij}$  a kapacitních  $\beta_{ij}$  koeficientů.

$$\underline{U}_0 = \mathbf{A}\underline{q} \quad (1)$$

kde,  $\underline{U}_0^T = [U_{10}, U_{20}, \dots, U_{M0}]$ ,  $U_{i0}$  je fázor napětí  $i$ -tého vodiče k zemi

$\underline{q}^T = [q_1, \dots, q_M]$ ,  $q_i$  je fázor náboje  $i$ -tého vodiče

$\mathbf{A} (M, M) = \{\alpha_{ij}\}$  je matice potenciálových koeficientů

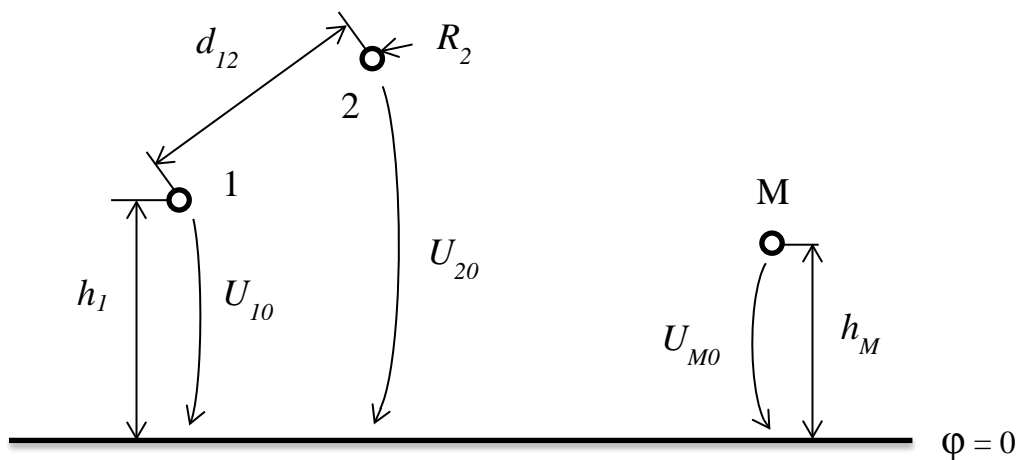
$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{2h_i}{R_i} \quad \alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{b_{ij}}{d_{ij}} \quad (2)$$

kde,  $h_i$  je výška  $i$ -tého vodiče nad zemí

$R_i$  je vlastní poloměr vodiče

$b_{ij}$  je vzdálenost mezi  $i$ -tým vodičem a obrazem  $j$ -tého vodiče (z metody zrcadlení)

$d_{ij}$  je vzdálenost mezi  $i$ -tým a  $j$ -tým vodičem



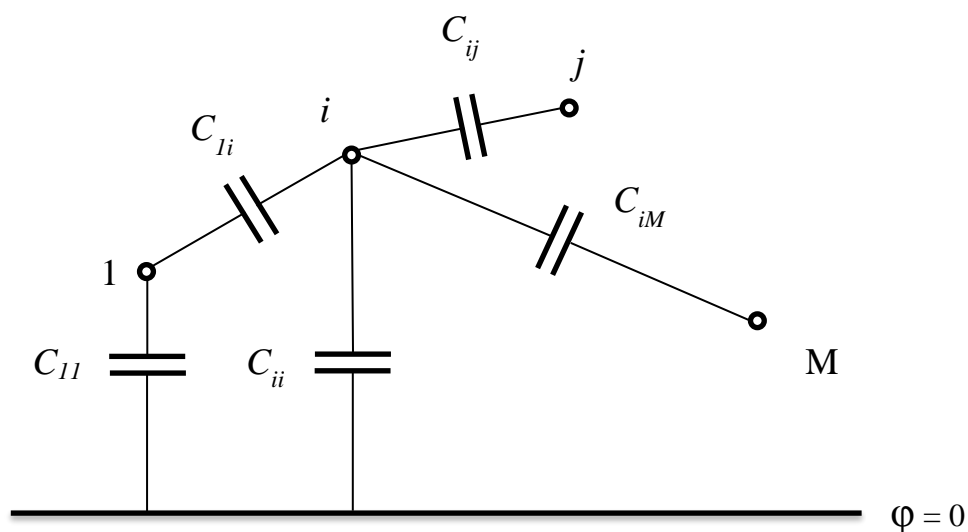
Obr. 8: Uspořádání s  $M$  fázovými vodiči [9]

Matrice kapacitních koeficientů  $\mathbf{B}$  je rovna invertované matici potenciálových koeficientů  $\mathbf{A}$ .

$$\mathbf{B} = \{\beta_{ij}\} = \mathbf{A}^{-1} \quad (3)$$

Z matice kapacitních koeficientů můžeme vypočítat kapacitu mezi jednotlivými vodiči  $C_{ij}$  a kapacitu jednotlivých vodičů k zemi  $C_{ii}$  dle následujících vztahů:

$$C_{ij} = -\{\beta_{ij}\} \quad C_{ii} = \sum_{j=1}^M \beta_{ij} \quad (4)$$

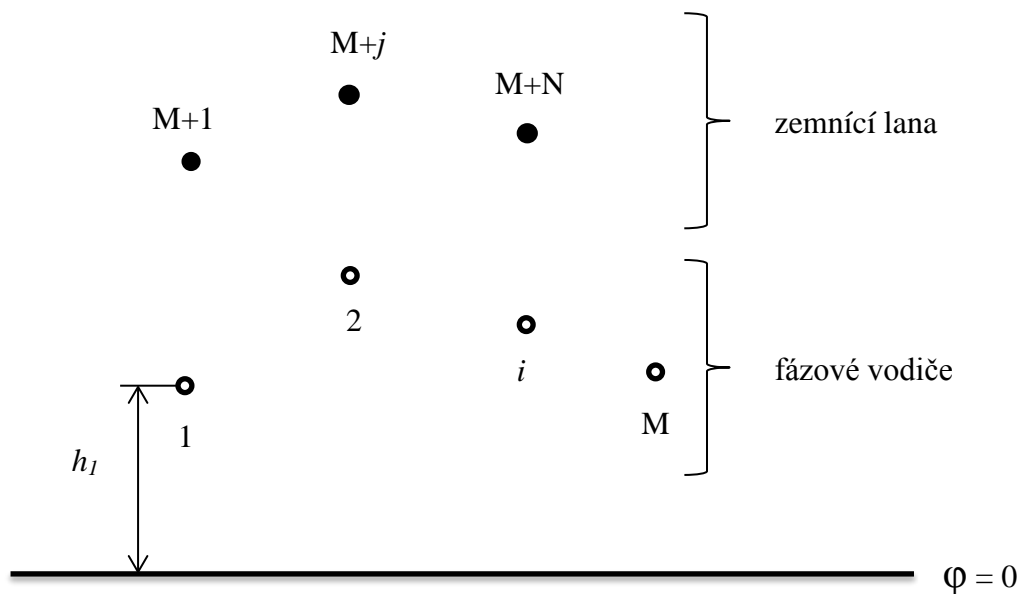


Obr. 8: Vzájemné kapacity v uspořádání s  $M$  fázovými vodiči [9]

### 3.2 Výpočet nábojů a kapacit v $M$ -vodičovém systému se zemnicími lany

Při uvažování zemnicích lan [9] do výpočtu zahrneme i uzemněná zemnicí lana, která mají nulové napětí  $U_i = 0$  pro  $i = M+1, \dots, M+N$ . Podobným způsobem můžeme popsat vztahy mezi napětími a náboji jednotlivých vodičů s respektováním zemnicích lan pomocí maticové rovnice

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{MM} & \mathbf{A}_{MN} \\ \mathbf{A}_{NM} & \mathbf{A}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_M \\ \mathbf{q}_N \end{bmatrix} \quad (5)$$


 Obr. 9 Uspořádání s  $M$  fázovými vodiči a s  $N$  zemnicím lany [9]

Z druhé řádky rovnice (5) můžeme vypočítat náboje zemnicích lan  $\mathbf{q}_N$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{NM}\mathbf{q}_M + \mathbf{A}_{NN}\mathbf{q}_N &= 0 \\ \Rightarrow \mathbf{q}_N &= -\mathbf{A}_{NN}^{-1}\mathbf{A}_{NM}\mathbf{q}_M \end{aligned} \quad (6)$$

Po dosazení zpět do původní rovnice (5) získáme vztah pro napětí a náboje fázových vodičů.

$$\mathbf{U}_M = (\mathbf{A}_{MM} - \mathbf{A}_{MN}\mathbf{A}_{NN}^{-1}\mathbf{A}_{NM})\mathbf{q}_M \quad (7)$$

Matice kapacitních koeficientů je tedy definována jako

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}_{MM} - \mathbf{A}_{MN}\mathbf{A}_{NN}^{-1}\mathbf{A}_{NM})^{-1} \quad (8)$$

a matice nábojů fázových vodičů jako

$$\mathbf{q}_M = \mathbf{B}\mathbf{U}_M \quad (9)$$

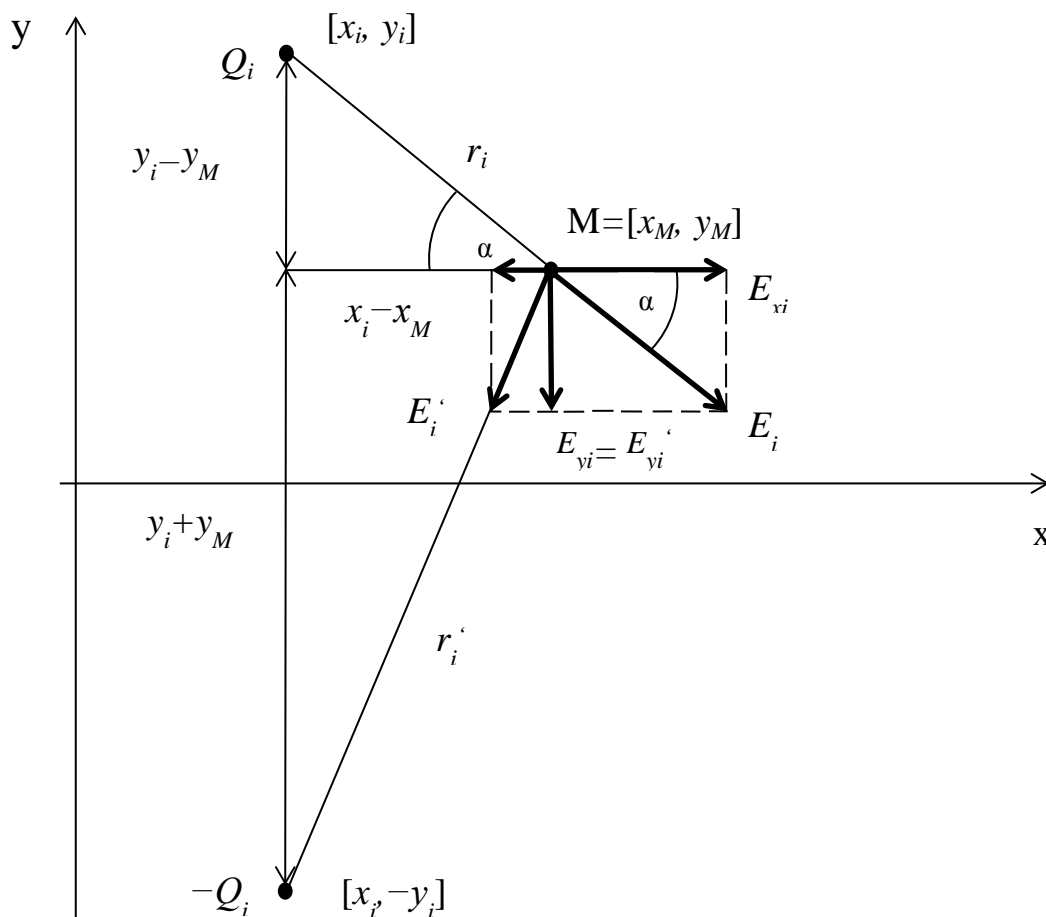
Na základě předchozích rovnic můžeme vyjádřit náboje zemnicích lan jako

$$\mathbf{q}_N = -\mathbf{A}_{NN}^{-1}\mathbf{A}_{NM}\mathbf{B}\mathbf{U}_M \quad (10)$$

V souladu s rovnicí (4) můžeme z rovnice (8) opět vypočítat kapacity celého uspořádání, jak je naznačeno na obr. 9. Oproti výpočtu bez uvažování zemnicích lan nyní kapacity  $C_{ii}$  respektují nejen kapacitu proti zemi ale také vazbu fázových a zemnicích lan.

### 3.3 Výpočet intenzity elektrického pole

Pro výpočet rozložení elektrického pole [10] 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  $y$ .



Obr. 10: Rozložení intenzity elektrického pole do složek  $x$  a  $y$  od  $i$ -tého vodiče a jeho obrazu

Pro  $x$ -ové složky intenzity můžeme z trojúhelníků na obr. 11 psát následující rovnice:

$$\cos \alpha = \frac{x_i - x_M}{r_i} \quad \cos \alpha' = \frac{x_i - x_M}{r_i'} \quad (11)$$

$$E_{xi} = E_i \cdot \cos \alpha = E_i \cdot \frac{x_i - x_M}{r_i} \quad E_{xi}' = E_i' \cdot \cos \alpha' = E_i' \cdot \frac{x_i - x_M}{r_i'} \quad (12)$$

Podobně pro y-ové složky intenzity dostáváme rovnice:

$$\sin \alpha = \frac{y_i - y_M}{r_i} \quad \sin \alpha' = \frac{y_i + y_M}{r_i'} \quad (13)$$

$$E_{yi} = E_i \cdot \sin \alpha = E_i \cdot \frac{y_i - y_M}{r_i} \quad E_{yi'} = E_i' \cdot \sin \alpha' = E_i' \cdot \frac{y_i + y_M}{r_i'} \quad (14)$$

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 tedy následující vztahy:

$$\mathbf{E}_{xi}(M) = kQ_i D_{xi} \quad \mathbf{E}_{yi}(M) = kQ_i D_{yi} \quad (15)$$

kde

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

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

$$r_i' = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M + y_i)^2} \quad \text{vzdálenost bodu M od obrazu } i\text{-tého vodiče} \quad (18)$$

$$k = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot l} = 1,8 \cdot 10^{10} \text{ (F}^{-1}\text{) pro } l = 1 \text{ m} \quad (19)$$

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

$$E_{xM} = \sum_i E_{xi}(M) \quad E_{yM} = \sum_i E_{yi}(M) \quad (20)$$

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

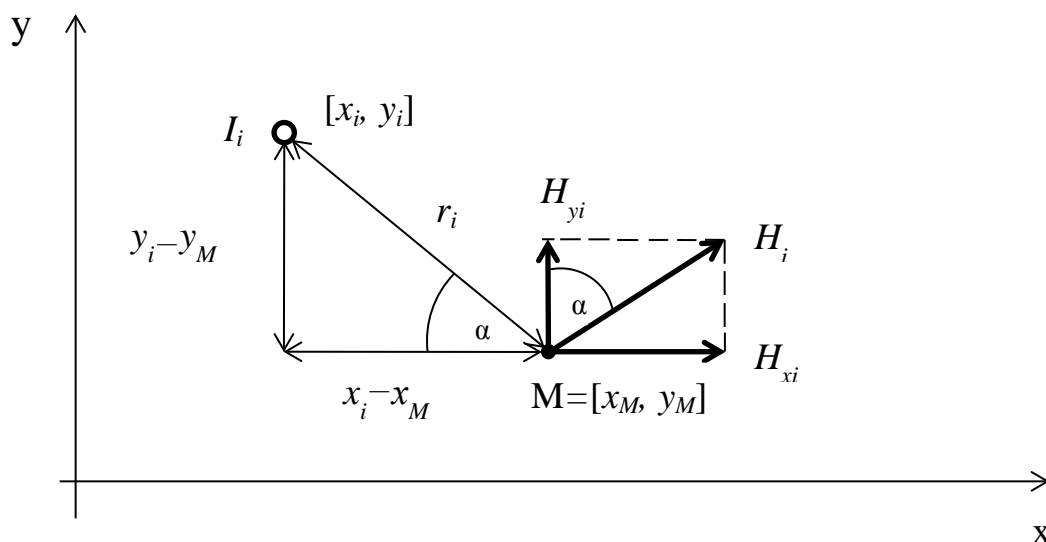
$$E_M = \sqrt{|E_{xM}|^2 + |E_{yM}|^2} \quad (21)$$



## 4 Základní principy řešení magnetického pole

Z první Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru vyplývá, že v blízkosti vodičů, kterými protéká elektrický proud, vzniká magnetické pole [8].

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 [10]. Výsledné magnetické pole v okolí vedení je dáno superpozicí intenzit magnetického pole od jednotlivých vodičů. Superpozice je nutné provádět vždy po složkách.



Obr. 11: Rozložení intenzity magnetického pole do složek  $x$  a  $y$  od  $i$ -tého vodiče

Podobně jako pro intenzitu elektrického pole můžeme i pro intenzitu magnetického pole psát rovnice pro  $x$ -ovou a  $y$ -ovou složku z obr. 12. S využitím rovnic (11) a (13) platí:

$$H_{xi}(M) = H_i \cdot \sin \alpha = H_i \cdot \frac{y_i - y_M}{r_i} \quad (22)$$

$$H_{yi}(M) = H_i \cdot \cos \alpha = H_i \cdot \frac{x_i - x_M}{r_i} \quad (23)$$

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 potom dána vztahem:

$$H_{xi}(M) = \frac{I_i}{2\pi} \frac{y_i - y_M}{r_i^2} \quad (24)$$

Pro složku  $H_y$  fázoru platí analogický vztah:

$$H_{yi}(M) = \frac{I_i}{2\pi} \frac{x_i - x_M}{r_i^2} \quad (25)$$

$$\text{kde} \quad r_i = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2} \quad i = 1, 2, \dots, 14 \quad (26)$$

$I_i$  ... 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:

$$H_{xM} = \sum_i H_{xi}(M) \quad H_{yM} = \sum_i H_{yi}(M) \quad (27)$$

Výsledná velikost fázoru intenzity magnetického pole je pak dána vztahem:

$$H_M = \sqrt{|H_{xM}|^2 + |H_{yM}|^2} \quad (28)$$

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

$$B_M = \mu \cdot H_M \text{ [T]} \quad (29)$$

## 5 Analytický výpočet rozložení elektromagnetického pole

Výpočet intenzity elektrického i magnetického pole byl proveden pro všech pět naznačených variant v odstavci 2.3.3. Pro všechny varianty se uvažovala kombinace dvojitého vedení 400 kV a dvojitého vedení 110 kV.

Pro samotný výpočet bylo přijato několik zjednodušujících opatření. Svazkové vodiče [12], které se používají u vedení o napětí 220 kV a vyšším byly nahrazeny jednoduchým vodičem s ekvivalentním poloměrem  $r_{SV}$  daný vztahem:

$$r_{SV} = R \cdot \sqrt[n]{\frac{n}{R} \cdot r} \quad (30)$$

kde  $R$  je vzdálenost středů jednotlivých vodičů ve svazku od středu svazku,  $n$  je počet vodičů svazku a  $r$  je poloměr jednoho z vodičů ve svazku.

Svazkové vodiče mají na rozložení elektrického a magnetického pole v blízkosti země mnohem menší vliv než v jejich těsné blízkosti. Proto si také můžeme dovolit tento vliv zanedbat a nahradit svazkové vodiče jedním vodičem, kterým prochází proud dané fáze.

Další zjednodušení se týká zemnicích lan. Ačkoli je zemnicí lano umístěno na stožáru pouze z důvodu ochrany vedení před atmosférickým přepětím, uplatní se při jeho provozu induktivní a kapacitní vazby s ostatními vodiči. Při provozu vedení se zemnicím lanem může vlivem induktivních vazeb protékat zemnicím lanem naindukovaný proud. Tento proud byl pro výpočet intenzity magnetického pole zanedbán. Vliv kapacitních vazeb je ve výpočtu zohledněn.

Ve všech výpočtech intenzity elektrického pole se počítá s amplitudami fázových napětí vůči zemi. Pro napětěovou hladinu 400 kV se tedy jednalo o hodnotu 326,6 kV a pro napětěovou hladinu 110 kV činila tato hodnota 89,8 kV. Podobně se i při výpočtu intenzity magnetického pole počítá s amplitudami proudů v jednotlivých fázích. Velikost amplitudy proudu pro 400 kV je 790 A a pro napětěovou hladinu 110 kV je to 370 A. Hodnoty proudů jsou určeny z přirozeného výkonu, který je přenášen na dané napětěové hladině.

Výsledky výpočtů jsou grafy rozložení elektrické a magnetické intenzity ve výšce 1,8 m nad zemí v rozsahu 40 m na obě strany od osy stožáru. Pro každý stožár byly vykresleny čtyři grafy – dva pro intenzitu elektrického pole (základní a minimální výška vodičů) a dva pro intenzitu magnetického pole (opět základní a minimální výška). Základní výšku vodičů představuje vzdálenost vodičů od země danou konstrukcí stožáru. Minimální výška

představuje polohu vodičů v maximálním průřezu. Tato výška je dána normou [13] (viz příloha B). Pro volnou krajinu činí minimální vzdálenost vodičů od země pro napětovou hladinu 110 kV 6 m. Pro napětovou hladinu 400 kV činí tato vzdálenost 7,8 m. Dosahované hodnoty elektrického i magnetického pole jsou hodnoceny na základě limitních hodnot dané normou [14] uvedené v příloze B.

Díky přítomnosti čtyř vedení se mohou na základě jejich vzájemné interakce [11] vykompenzovat nebo také zesílit účinky elektrického i magnetického pole. Zda se intenzity polí vykompenzují nebo zesílí, určuje konfigurace fází jednotlivých vedení. Lze tedy říci, že u všech násobných vedení má konfigurace fází značný vliv na výsledné rozložení elektrického či magnetického pole. Vzhledem k tomu, že v případě navržených variant SDV je na každém stožáru umístěno celkem 14 vodičů (12 fázových a 2 zemnicí), připadá v úvahu 196 možných uspořádání. Na základě [11] byly předem vybrány takové konfigurace, které vykazovaly nejpříznivější a nejnepříznivější rozložení elektromagnetického pole. Tím se celkový počet konfigurací zredukoval na 36. Z těch bylo následně vybráno 5 uspořádání, která jsou vykreslena v grafech pro každou stožárovou konstrukci. Ke každému grafu přísluší tabulka, ve které jsou maximální hodnoty intenzity elektrického nebo magnetického pole. Zároveň je v tabulce naznačeno pomocí písmen (*A*, *B*, *C* pro 400 kV a *a*, *b*, *c* pro 110 kV) o jakou konfiguraci fází se jedná.

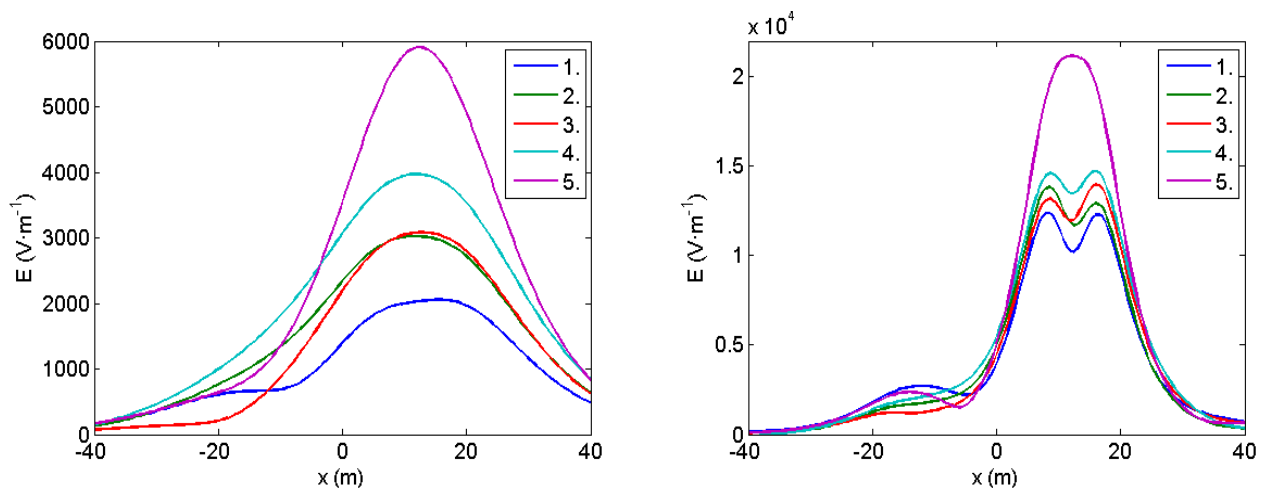
Geometrické rozměry, které byly použity pro výpočet, se pro stožár tvaru Donau shodují s rozměry na obr. 2. Rozměry stožárů tvaru Soudek se nacházejí na obr. 4. Geometrickým rozměrům stožárů D-type a Vertical odpovídají obr. A3 a A4 v příloze A.

## 5.1 Výpočet intenzity elektrického pole

### 5.1.1 Stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně stožáru

Tab. 2: Konfigurace a max. hodnoty intenzity elektrického pole pro stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně

Konfigurace	1.	2.	3.	4.	5.
Uspořádání fází	c c'   B C'	c b'   B C'	c a'   A C'	c c'   C C'	c b'   A C'
	b b'   A A'	b a'   C A'	b c'   B A'	b a'   B A'	b c'   C A'
	a a'   C B'	a c'   A B'	a b'   C B'	a b'   A B'	a a'   B B'
$E_{MAX}$ základní výška ( $V \cdot m^{-1}$ )	2054,9	3023,2	3080,2	3970,6	5906,6
$E_{MAX}$ minimální výška ( $V \cdot m^{-1}$ )	7459,9	8793,6	8905,6	9858,3	15459,0



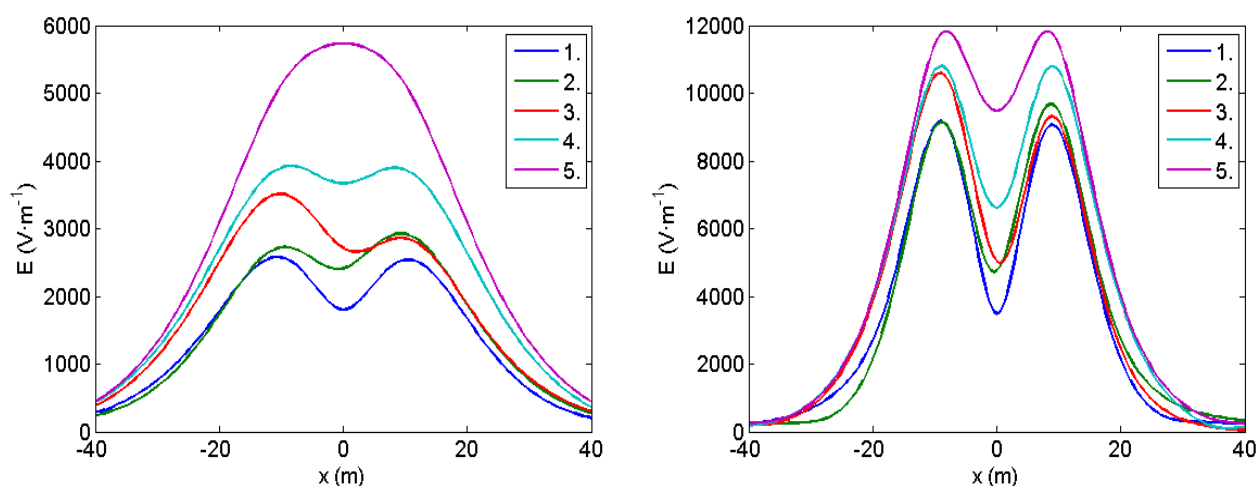
Obr. 12: Graf rozložení intenzity elektrického pole základní (vlevo) a minimální (vpravo) výšky pro stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně

Z obou grafů je patrné, že vyšší napěťová hladina je umístěna na pravé straně stožáru, kde i intenzita elektrického pole dosahuje maxima. Nejnížší hodnotu intenzity a tedy i největší kompenzaci elektrických polí vedení vykazuje pro základní výšku 1. konfigurace. Ačkoliv jsou na straně DS dvě shodné fáze vedle sebe nepřekročí intenzita elektrické pole hodnotu  $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ . Naopak při umístění shodných fází vedle sebe na straně PS (5. konfigurace) dosahujeme právě nejvyšších možných hodnot elektrické intenzity. Při výpočtu intenzity pro minimální výšku bylo shledáno, že všechny z konfigurací přesahují limitní hodnotu  $10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ . Po navýšení minimální vzdálenosti od země o 2 metry se do limitu  $10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$  vešly první dvě konfigurace.

### 5.1.2 Stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce

Tab. 3: Konfigurace fází a max. hodnoty intenzity elektrického pole pro stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce

Konfigurace	1.		2.		3.		4.		5.	
Uspořádání fází	c B	C' b'	c A	C' b'	c B	C' a'	c C	C' a'	c C	C' c'
	b A	A' a'	b B	A' c'	b C	A' b'	b B	A' c'	a A	A' a'
	a C	B' b'	a C	B' a'	a A	B' c'	a A	B' b'	b B	B' b'
$E_{MAX}$ základní výška ( $V \cdot m^{-1}$ )	2579,6		2929,0		3511,8		3924,7		5730,1	
$E_{MAX}$ minimální výška ( $V \cdot m^{-1}$ )	9170,4		9673,2		10593,0		10804,0		11822,0	



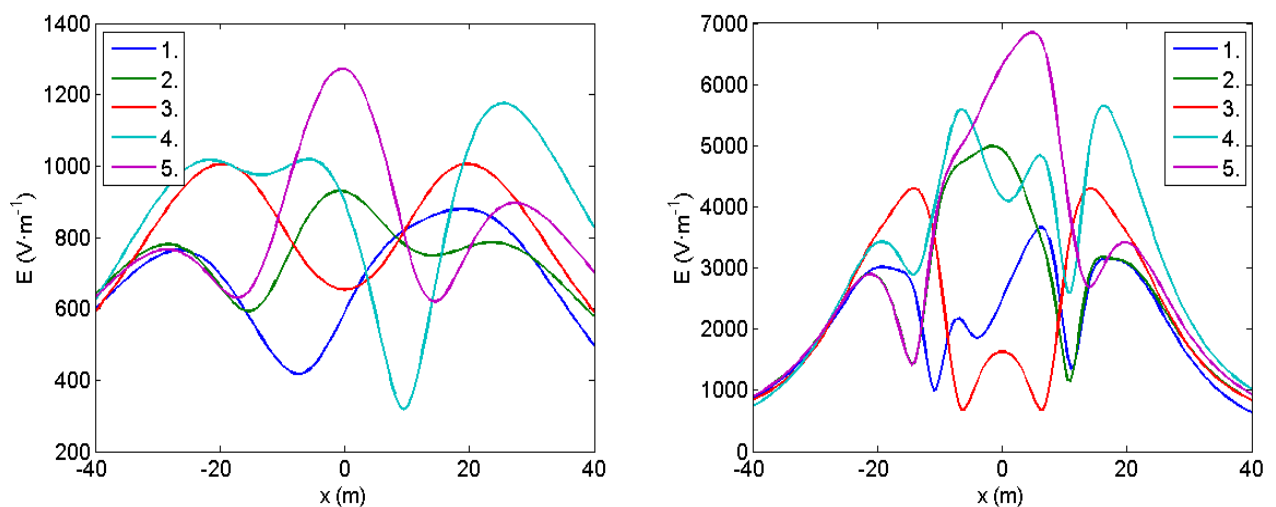
Obr. 13: Graf rozložení intenzity elektrického pole základní (vlevo) a minimální (vpravo) výšky pro stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce

U obou grafů mají křivky dvě maxima, které odpovídají poloze nejnižších vodičů. U 4. a 5. konfigurace, kde jsou vedle sebe na obou stranách umístěny stejné fáze, byly pro obě výšky zaznamenány nejvyšší hodnoty elektrické intenzity. V ose stožáru dochází ke kompenzaci, a tak zatímco ve vzdálenosti 10 metrů od stožáru je intenzita elektrického pole maximální v ose stožáru klesá u některých konfigurací až o  $4 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ . K největší kompenzaci a tedy i nejnižší elektrické intenzitě dochází u 1. konfigurace. Pro minimální výšku splňují požadavky normy [14] (viz příloha B) pouze 1. a 2. konfigurace. Je však nutné podotknout, že i tyto hodnoty atakují limit  $10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ . Proto by bylo i u tohoto stožáru vhodné zajistit minimální výšku alespoň o 2 metry vyšší.

### 5.1.3 Stožár Donau s vedením PS nad vedením DS

Tab. 4: Konfigurace fází a max. hodnoty intenzity elektrického pole pro stožár Donau

Konfigurace	1.		2.		3.		4.		5.	
Uspořádání fází	B	C'	A	C'	C	C'	A	C'	A	C'
	C A	B' A'	C B	B' A'	B A	B' A'	B C	B' A'	C B	B' A'
	abc	a'c'b'	abc	a'c'b'	abc	c'a'b'	abc	b'c'a'	abc	b'a'c'
$E_{MAX}$ základní výška ( $V \cdot m^{-1}$ )	879,6		930,1		1005,7		1175,6		1272,5	
$E_{MAX}$ minimální výška ( $V \cdot m^{-1}$ )	3660,1		4993,6		4300,8		5647,4		6848,7	



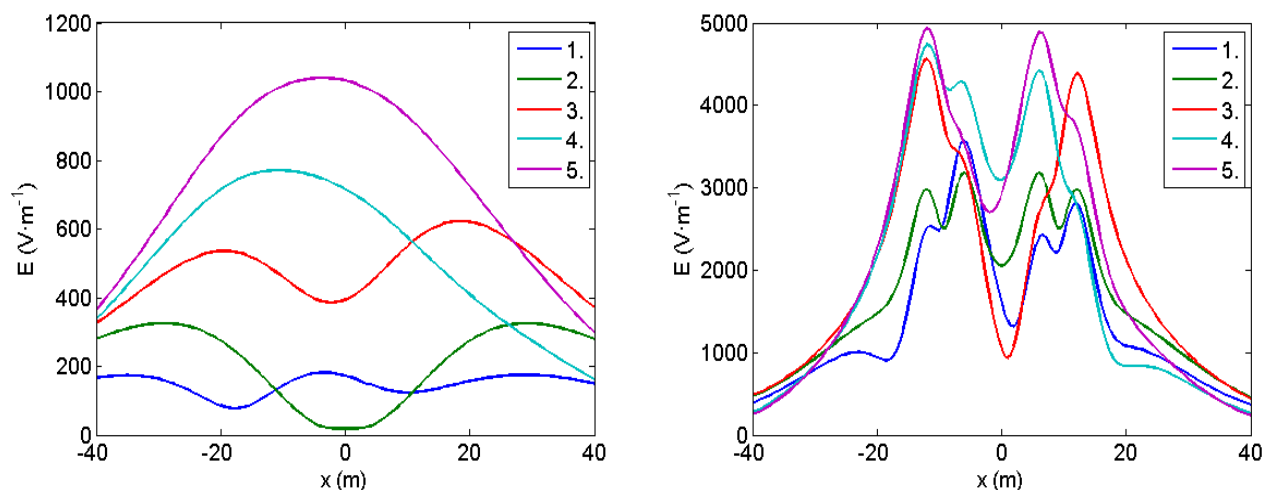
Obr. 14: Graf rozložení intenzity elektrického pole základní (vlevo) a minimální (vpravo) výšky pro stožár Donau

Z dosahovaných hodnot i ze samotných průběhů intenzity elektrického pole je vidět, že umístění vedení vyšší napěťové hladiny nad vedení nižší napěťové hladiny vede logicky ke slabšímu elektrickému poli u povrchu země. Se složitějším geometrickým uspořádáním dochází u stožáru Donau k mnohem větším kompenzacím elektrického pole než u předchozích stožárů. Nejpříznivější rozložení elektrické intenzity vykazuje 1. konfigurace, kde maximální hodnota intenzity nepřekročí  $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ . U rozložení intenzity pro minimální výšku zaznamenáme pro 1. konfiguraci opět velice nízkou hodnotu, která je srovnatelná s nejlepšími konfiguracemi pro základní výšku stožáru Soudek. Symetrické rozložení vykazuje pouze 3. konfigurace, u které zároveň nastává velká kompenzace v ose stožáru. Nejpříznivější rozložení intenzity nastává opět u 5. konfigurace, kdy je naopak v ose stožáru maximum.

### 5.1.4 Stožár D-type s vedením PS nad vedením DS

Tab. 5: Konfigurace fází a max. hodnoty intenzity elektrického pole pro stožár tvaru D-type

Konfigurace	1.		2.		3.		4.		5.	
Uspořádání fází	A	C'	B	C'	B	C'	C	C'	C	C'
	B	A'	A	A'	C	A'	B	A'	A	A'
	C	B'	C	B'	A	B'	A	B'	B	B'
	c	b'	c	b'	c	a'	c	a'	c	c'
	a b	a' c'	a b	c' a'	a b	c' b'	a b	b' c'	b a	b' a'
$E_{MAX}$ základní výška ( $V \cdot m^{-1}$ )	181,3		325,0		622,6		770,6		1039,7	
$E_{MAX}$ minimální výška ( $V \cdot m^{-1}$ )	3573,4		3180,8		4560,7		4736,4		4937,6	



Obr. 15: Graf rozložení intenzity elektrického pole základní a minimální výšky pro stožár tvaru D-type

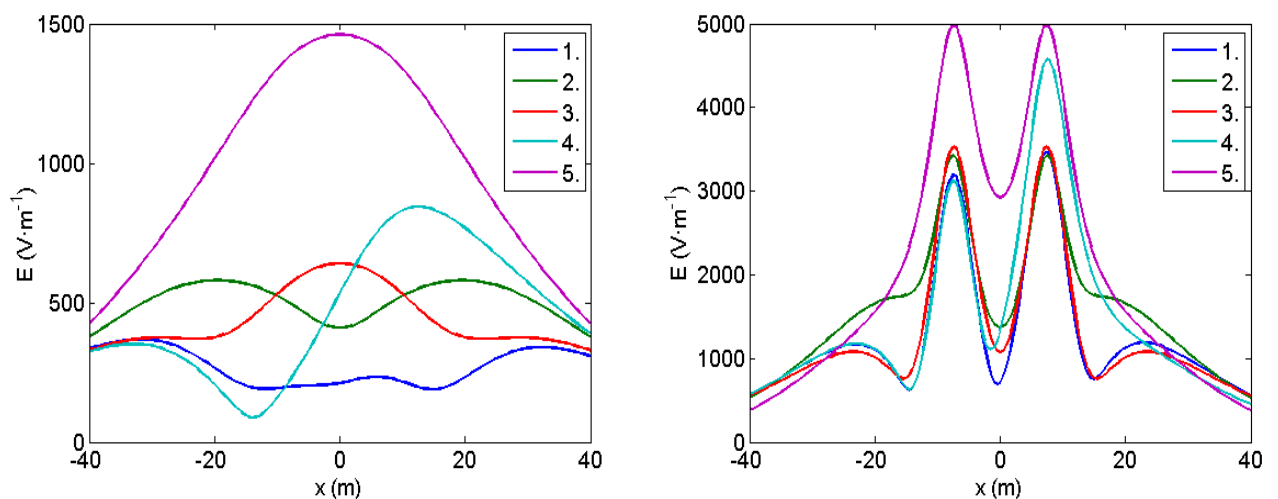
Rozložení intenzity elektrického pole stožáru D-type je pro všechny varianty velice příznivé zejména kvůli značné výšce celého stožáru. Pro základní výšku pouze 5. konfigurace přesahuje intenzitu  $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ . I zde dochází ke kompenzaci zejména u 2. konfigurace, která pro minimální výšku vykazuje nejnižší intenzitu ze všech konfigurací. I přes to, že je stožárová konstrukce D-type vyšší než stožár Donau jsou rozložení intenzit elektrických polí jednotlivých konfigurací (zejména 1. a 2.) srovnatelná u obou stožárů. Výhodou vysoké stožárové konstrukce je užší pásmo vlivu elektrického pole (intenzita elektrického pole nepřesáhne  $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ), které je pro D-type vzdáleno do 30 m od osy stožáru zatímco u ostatních stožárů činí tato vzdálenost přibližně 40 m.



### 5.1.5 Stožár Vertical s vedením PS nad vedením DS

Tab. 6: Konfigurace fází a max. hodnoty intenzity elektrického pole pro stožár Vertical

Konfigurace	1.		2.		3.		4.		5.	
Uspořádání fází	A	C'	A	C'	B	C'	A	C'	C	C'
	B	A'	C	A'	A	A'	B	A'	A	A'
	C	B'	B	B'	C	B'	C	B'	B	B'
	c	b'	c	a'	c	b'	c	a'	c	c'
	b	a'	b	b'	b	c'	b	c'	a	a'
	a	c'	a	c'	a	a'	a	b'	b	b'
$E_{MAX}$ základní výška ( $V \cdot m^{-1}$ )	368,7		579,8		640,5		843,7		1460,7	
$E_{MAX}$ minimální výška ( $V \cdot m^{-1}$ )	3471,7		3427,1		3530,3		4575,8		4986,5	



Obr. 16: Graf rozložení intenzity el pole základní a minimální výšky pro stožár Vertical

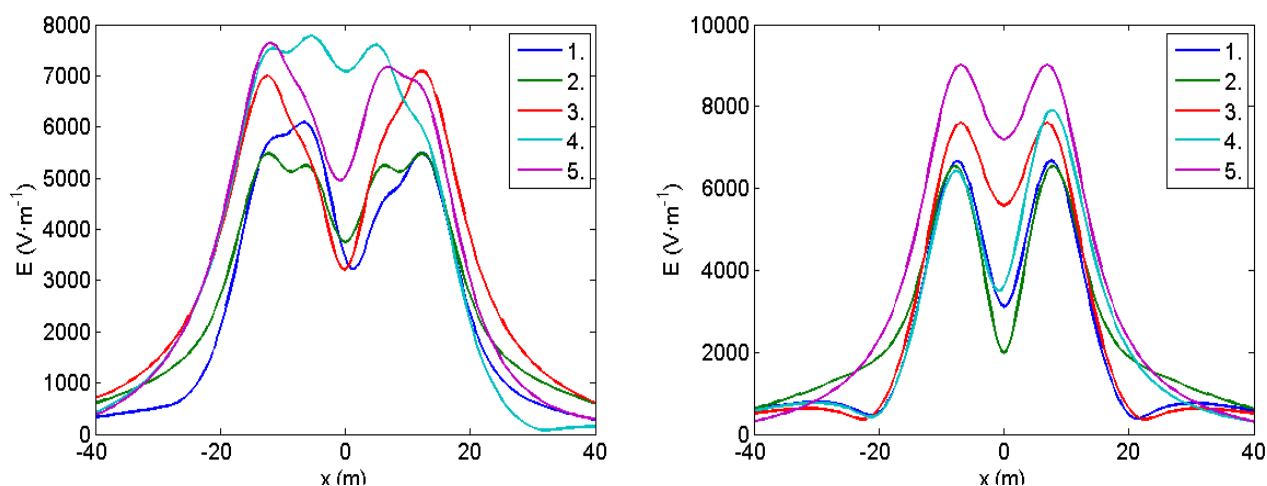
Stožárová konstrukce Vertical je stejně vysoká jako konstrukce D-type, a tak i rozložení intenzity elektrického pole nedosahuje vysokých hodnot. Jelikož je stožár Vertical svojí geometrií velice podobný stožáru Soudek, je i rozložení intenzity elektrického pole velice podobné samotnému rozložení stožáru Soudek jako v [11]. Z grafu rozložení elektrické intenzity pro minimální výšku jsou patrné extrémní křivky v pozicích odpovídající umístění vodičů. V ose stožáru dochází k vysoké kompenzaci. Nejhorší rozložení intenzity představuje 5. konfigurace, která je naprosto symetrická. Pásmo vlivu elektrického pole stožáru Vertical je stejně jako u stožáru D-type, tedy 30 m od osy stožáru.

### 5.1.6 Porovnání elektrických polí stožárů D-type a Vertical 4x400 kV

Z důvodů příznivého rozložení intenzity elektrického pole, značné výšky a faktu, že stožáry D-type a Vertical jsou primárně určeny pro vyšší napěťové hladiny, byl proveden dodatečný výpočet pro rozložení elektrického pole minimální výšky pro napěťové hladiny 4x400 kV. Konfigurace fází obou stožárů jsou stejné jako v odstavcích 5.1.4 a 5.1.5.

Tab. 7: Hodnoty maximální intenzity elektrického pole pro stožáry D-type a Vertical s vedením 4x400 kV

konfigurace	1.	2.	3.	4.	5.
$E_{MAX}$ min. výška pro D-type ( $V \cdot m^{-1}$ )	6091,9	5479,9	7091,4	7777,5	7646,7
$E_{MAX}$ min. výška Vertical ( $V \cdot m^{-1}$ )	6673,9	6541,5	7595,6	7901,8	9014,1



Obr. 17: Graf rozložení intenzity elektrického pole minimální výšky pro stožár D-type (vlevo) a stožár Vertical (vpravo)

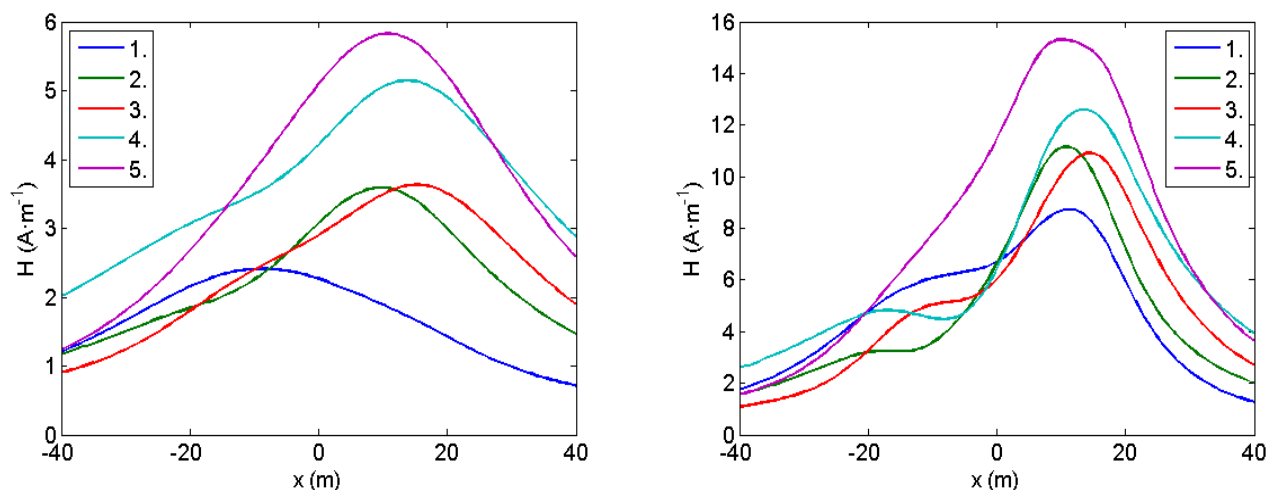
Jak je vidět z obou grafů, ani jedna z křivek popisující rozložení elektrické intenzity nepřesahuje limitní hodnotu  $10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ . U obou stožárů dochází ke kompenzaci zejména v jejich osách, ale vzhledem k vhodnějšímu geometrickému uspořádání stožáru D-type nastává větší kompenzace právě u této konstrukce. Nejpriznivější rozložení intenzity mají 2. konfigurace pro oba stožáry, avšak tyto hodnoty se liší o více jak  $1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$  ve prospěch stožáru D-type. Maximální hodnoty intenzit vykazují u obou stožárů opět symetrické konfigurace fází (4. a 5.). Vzhledem k příznivějšímu rozložení intenzity elektrického pole je vhodnější pro vedení 4x400 kV stožárová konstrukce D-type.

## 5.2 Výpočet intenzity magnetického pole

### 5.2.1 Stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně stožáru

Tab. 8: Konfigurace a max. hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce pro stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně

konfigurace	1.		2.		3.		4.		5.	
uspořádání fází	c c'	B C'	c b'	B C'	c a'	A C'	c c'	C C'	c b'	A C'
	b b'	A A'	b a'	C A'	b c'	B A'	b a'	B A'	b c'	C A'
	a a'	C B'	a c'	A B'	a b'	C B'	a b'	A B'	a a'	B B'
H <sub>MAX</sub> základní výška (A·m <sup>-1</sup> )	2,41		3,59		3,63		5,14		5,82	
B <sub>MAX</sub> základní výška (μT)	3,02		4,51		4,56		6,46		7,32	
H <sub>MAX</sub> minimální výška (A·m <sup>-1</sup> )	8,73		11,16		10,92		12,59		15,31	
B <sub>MAX</sub> minimální výška (μT)	10,97		14,02		13,72		15,83		19,24	



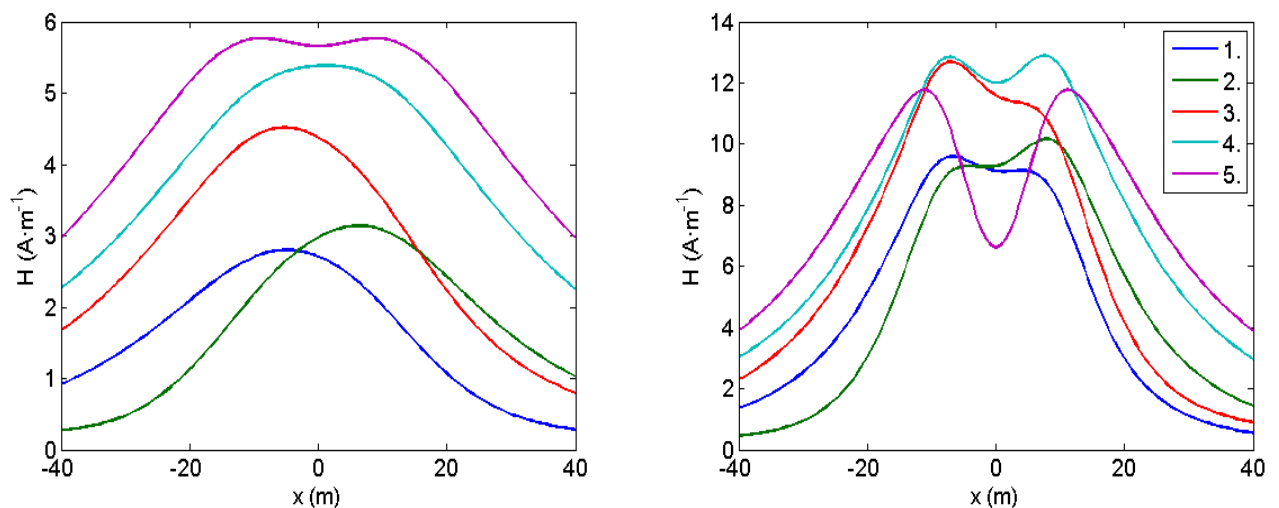
Obr. 18: Graf rozložení intenzity magnetického pole základní (vlevo) a minimální (vpravo) výšky pro stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně

Podobně jako u rozložení intenzity elektrického pole se i zde více projeví vliv vyšší napěťové hladiny na pravé straně stožáru. Zajímavé rozložení intenzity magnetického pole má 1. konfigurace, u které se projeví vliv vyšší napěťové hladiny až při výpočtu intenzity minimální výšky. Maximální intenzity magnetického pole dosahuje opět symetrická 5. konfigurace. Hodnoty magnetické indukce však zdaleka nepřesahují povolenou hodnotu 0,5 mT.

### 5.2.2 Stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce

Tab. 9: Konfigurace a max. hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce pro stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce

Konfigurace	1.		2.		3.		4.		5.	
Uspořádání fází	c B	C' b'	c A	C' b'	c B	C' a'	c C	C' a'	c C	C' c'
	b A	A' a'	b B	A' c'	b C	A' b'	b B	A' c'	a A	A' a'
	a C	B' b'	a C	B' a'	a A	B' c'	a A	B' b'	b B	B' b'
H <sub>MAX</sub> základní výška ( $A \cdot m^{-1}$ )	2,79		3,14		4,52		5,38		5,77	
B <sub>MAX</sub> základní výška ( $\mu T$ )	3,52		3,95		5,67		6,76		7,25	
H <sub>MAX</sub> minimální výška ( $A \cdot m^{-1}$ )	9,58		10,16		12,69		12,89		11,77	
B <sub>MAX</sub> minimální výška ( $\mu T$ )	12,04		12,77		15,95		16,20		14,79	



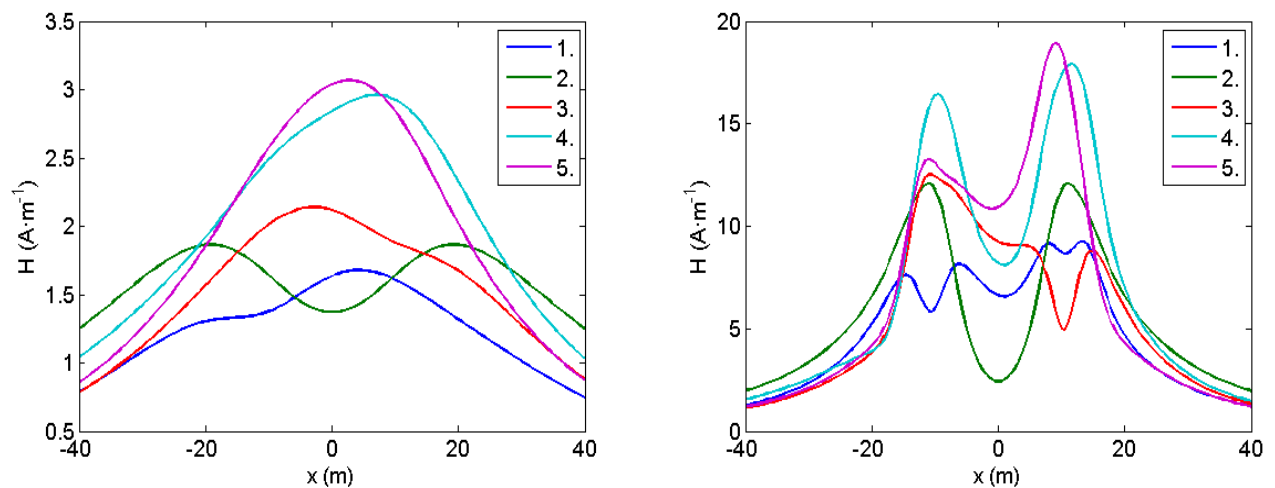
Obr. 19: Graf rozložení intenzity magnetického pole základní a minimální výšky pro stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce

Symetrická 5. konfigurace fází paradoxně nevykazuje nejvyšší hodnotu magnetické intenzity, jako je tomu u ostatních stožárů. U 5. konfigurace naopak zaznamenáváme největší kompenzaci magnetického pole v ose stožáru. Nejlepší 1. konfigurace se v případě výpočtu maximální hodnoty intenzity pro minimální výšku od 5. konfigurace liší o  $2,75 A \cdot m^{-1}$ .

### 5.2.3 Stožár Donau s vedením PS nad vedením DS

Tab. 10: Konfigurace fází a max. hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce pro stožár Donau

Konfigurace	1.		2.		3.		4.		5.	
Uspořádání fází	B	C'	A	C'	C	C'	A	C'	A	C'
	C A	B' A'	C B	B' A'	B A	B' A'	B C	B' A'	C B	B' A'
	abc	a'c'b'	abc	a'c'b'	abc	c'a'b'	abc	b'c'a'	abc	b'a'c'
H <sub>MAX</sub> základní výška (A·m <sup>-1</sup> )	1,67		1,86		2,13		2,96		3,06	
B <sub>MAX</sub> základní výška (μT)	2,10		2,34		2,68		3,72		3,85	
H <sub>MAX</sub> minimální výška (A·m <sup>-1</sup> )	9,25		12,09		12,53		17,91		18,94	
B <sub>MAX</sub> minimální výška (μT)	11,63		15,19		15,74		22,51		23,80	



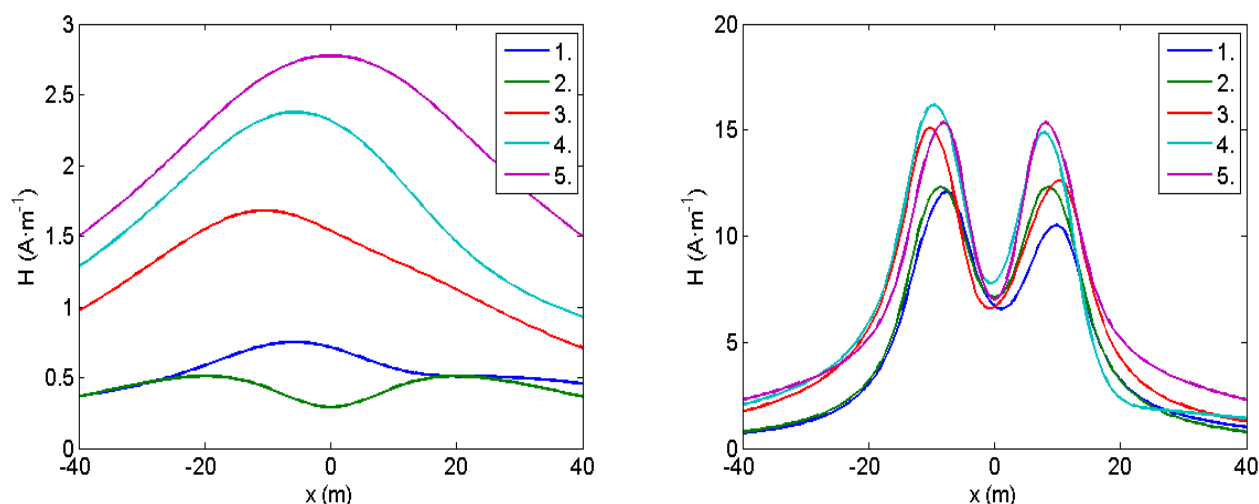
Obr. 20: Graf rozložení intenzity magnetického pole základní a minimální výšky pro stožár Donau

Rozložení intenzity magnetického pole stožáru Donau je svou velikostí srovnatelné s rozložením magnetické intenzity obou předchozích stožárů. Obdobně jako u intenzity elektrického pole i zde nastává větší kompenzace magnetického pole, která se projevuje i na jiných místech než v ose stožáru.

### 5.2.4 Stožár D-type s vedením PS nad vedením DS

Tab. 11: Konfigurace fází a max. hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce pro stožár D-type

Konfigurace	1.		2.		3.		4.		5.	
Uspořádání fází	A	C'	B	C'	B	C'	C	C'	C	C'
	B	A'	A	A'	C	A'	B	A'	A	A'
	C	B'	C	B'	A	B'	A	B'	B	B'
	c	b'	c	b'	c	a'	c	a'	c	c'
	a b	a' c'	a b	c' a'	a b	c' b'	a b	b' c'	a b	b' a'
H <sub>MAX</sub> základní výška (A·m <sup>-1</sup> )	0,75		0,51		1,68		2,38		2,77	
B <sub>MAX</sub> základní výška (μT)	0,94		0,64		2,11		2,99		3,49	
H <sub>MAX</sub> minimální výška (A·m <sup>-1</sup> )	12,10		12,31		15,10		16,17		15,34	
B <sub>MAX</sub> minimální výška (μT)	15,21		15,46		18,97		20,33		19,28	



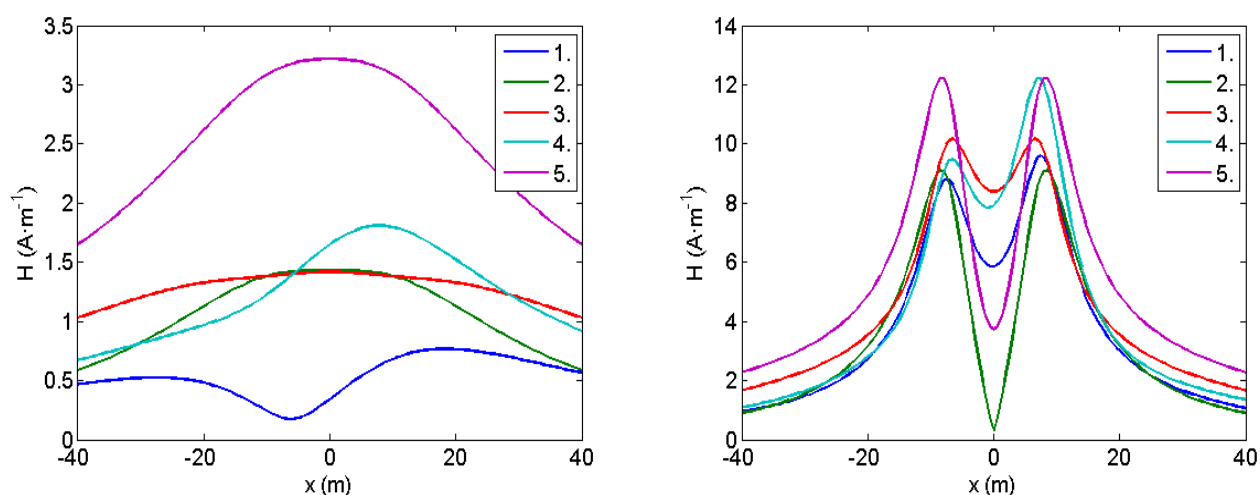
Obr. 21: Graf rozložení intenzity magnetického pole základní a minimální výšky pro stožár D-type

Ačkoliv výška konstrukce D-type v případě rozložení elektrického pole výrazně snížila maximálně dosahované hodnoty elektrické intenzity, v případě rozložení magnetické intenzity tomu tak není. Maximální dosahované hodnoty intenzity magnetického pole jsou srovnatelné s hodnotami stožáru Donau ale i Soudek. Průběhy všech konfigurací mají podobný tvar s dvěma maximy a výrazným poklesem v ose stožáru.

### 5.2.5 Stožár Vertical s vedením PS nad vedením DS

Tab. 12: Konfigurace fází a max. hodnoty intenzity magnetického pole a magnetické indukce pro stožár Vertical

konfigurace	1.		2.		3.		4.		5.	
uspořádání fází	A	C'	A	C'	B	C'	A	C'	C	C'
	B	A'	C	A'	A	A'	B	A'	A	A'
	C	B'	B	B'	C	B'	C	B'	B	B'
	c	b'	c	a'	c	b'	c	a'	c	c'
	b	a'	b	b'	b	c'	b	c'	a	a'
	a	c'	a	c'	a	a'	a	b'	b	b'
H <sub>MAX</sub> základní výška (A·m <sup>-1</sup> )	0,77		1,43		1,42		1,81		3,22	
B <sub>MAX</sub> základní výška (μT)	0,96		1,80		1,78		2,27		4,04	
H <sub>MAX</sub> minimální výška (A·m <sup>-1</sup> )	9,60		9,09		10,17		12,21		12,21	
B <sub>MAX</sub> minimální výška (μT)	12,07		11,43		12,78		15,35		15,34	



Obr. 22: Graf rozložení intenzity magnetického pole základní a minimální výšky pro stožár Vertical

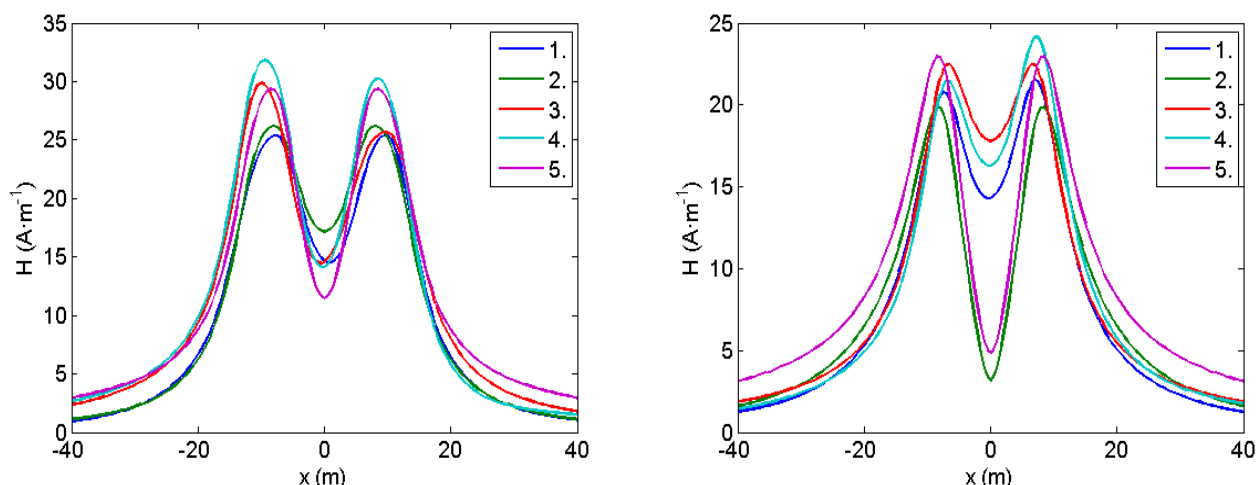
Maximální hodnoty intenzity magnetického pole stožáru Vertical jsou nejnižší ze všech stožárů. Průběhy křivek pro minimální výšku mají všechny podobný průběh. V ose stožáru dochází ke kompenzaci magnetického pole, která je nejvýraznější u 2. konfigurace. Nejnejpříznivější rozložení má symetrické uspořádání fází.

### 5.2.6 Porovnání magnetických polí stožárů D-type a Vertical 4x400 kV

Pro úplnost byl proveden výpočet rozložení magnetického pole minimální výšky obou stožárů pro napěťové hladiny 4x400 kV. Konfigurace fází obou stožárů jsou stejné jako v odstavcích 5.2.4 a 5.2.5.

Tab. 13: Hodnoty maximální intenzity magnetického pole a magnetické indukce pro stožáry D-type a Vertical s vedením 4x400 kV

konfigurace	1.	2.	3.	4.	5.
H <sub>MAX</sub> min. výška D-type ( $A \cdot m^{-1}$ )	25,37	26,19	29,87	31,82	29,36
B <sub>MAX</sub> min. výška D-type ( $\mu T$ )	31,89	32,91	37,53	39,98	36,89
H <sub>MAX</sub> min. výška Vertical ( $A \cdot m^{-1}$ )	21,51	19,86	22,47	24,14	22,95
B <sub>MAX</sub> min. výška Vertical ( $\mu T$ )	27,03	24,96	28,24	30,34	28,84



Obr. 23: Graf rozložení intenzity magnetického pole minimální výšky pro stožár D-type (vlevo) a stožár Vertical (vpravo)

Rozložení intenzity magnetického pole minimální výšky je příznivější pro stožár Vertical. U stožáru D-type jsou maximální hodnoty intenzity magnetického pole vyšší v průměru o  $7 A \cdot m^{-1}$  než hodnoty u stožáru Vertical. Z hlediska rozložení magnetického pole je tedy vhodnější stožár Vertical. Maximální hodnoty magnetické indukce obou stožárů však zdaleka nepřesahují maximální povolenou hodnotu 0,5 mT.

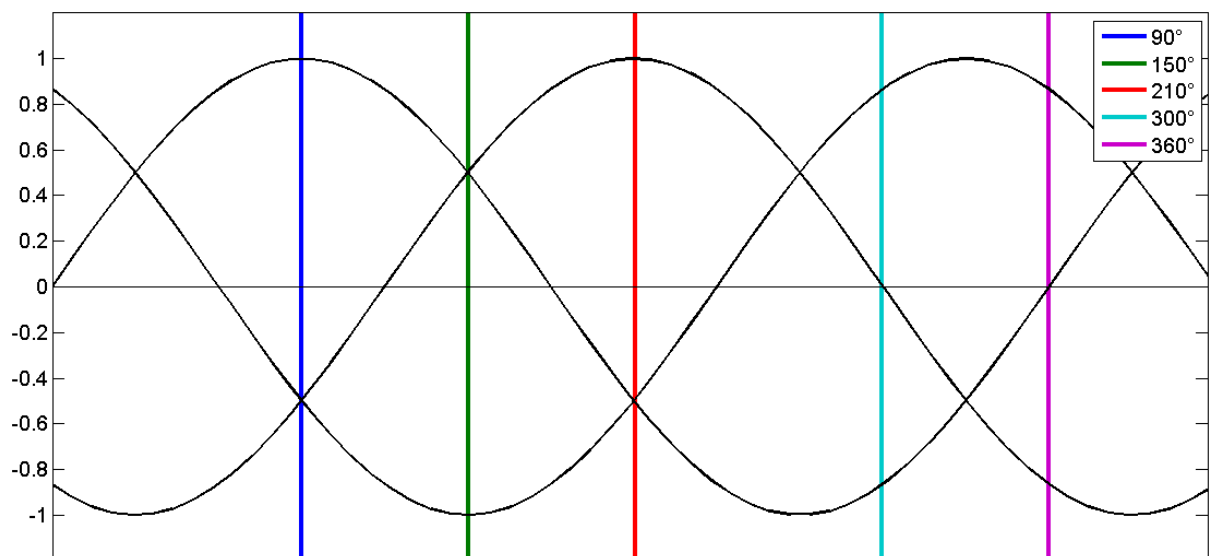


## 6 Numerický výpočet rozložení elektromagnetického pole

Numerický výpočet obou polí byl proveden v programu Agros2D, který byl vyvinut na Západočeské univerzitě v Plzni. Agros2D [15] je univerzální multiplatformní program určený pro řešení fyzikálních polí buďto v kartézském nebo osově symetrickém uspořádání. Pro řešení diferenciálních rovnic využívá knihovnu Hermes2D.

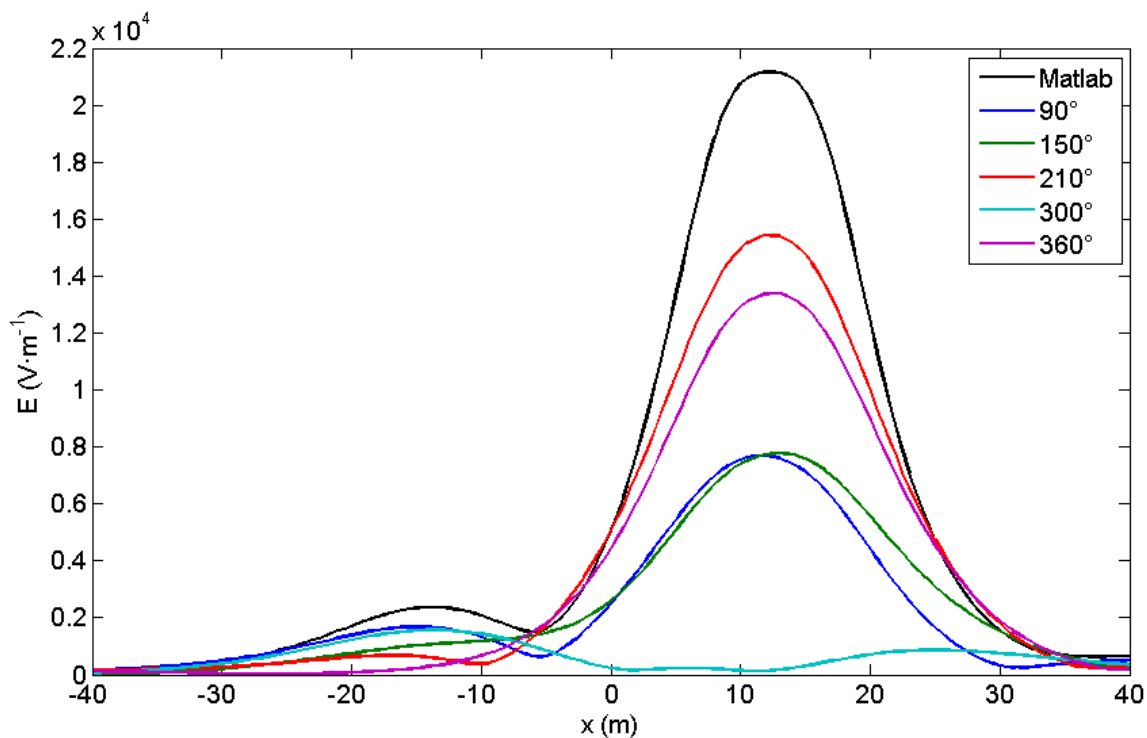
### 6.1 Simulace rozložení elektrického pole

Protože program Agros2D neumožňuje harmonickou analýzu elektrického pole, bylo pro simulaci využito pole elektrostatické, kdy bylo každému vodiči přiřazeno konstantní napětí příslušící jednomu z časových okamžiků dle obr. 25. Pro přibližné určení rozložení elektrického pole byl tedy výpočet pětkrát opakován pro pět časových okamžiků.

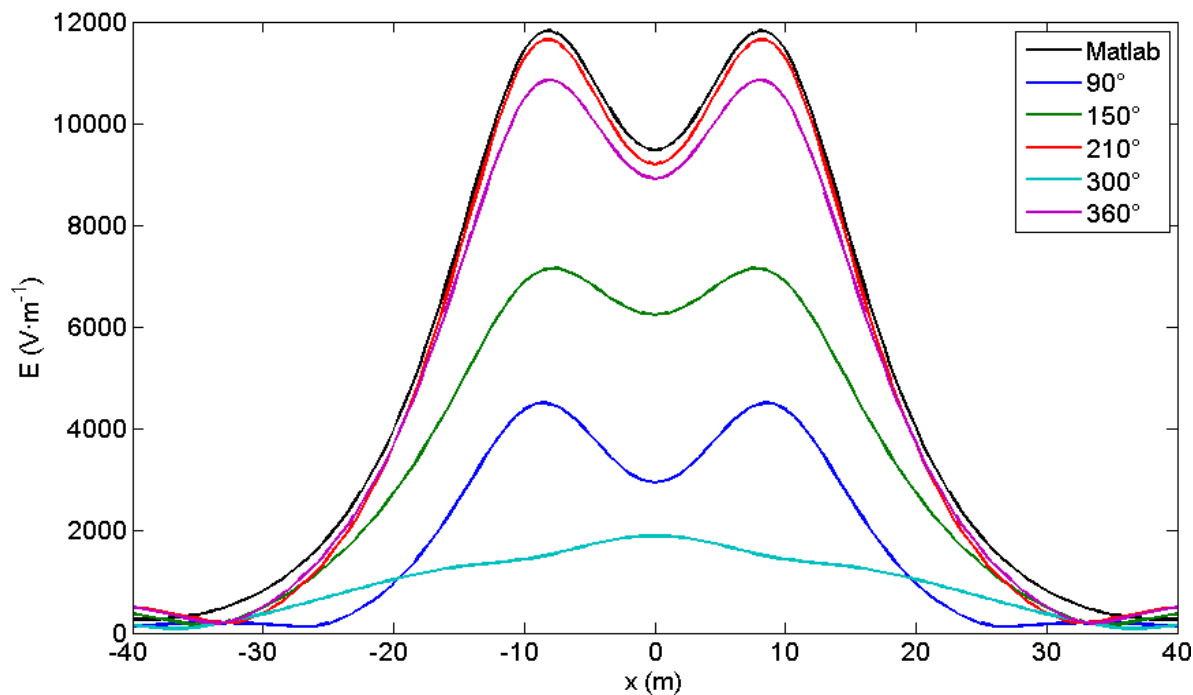


Obr. 24: Časové okamžiky pro simulaci elektrostatického pole

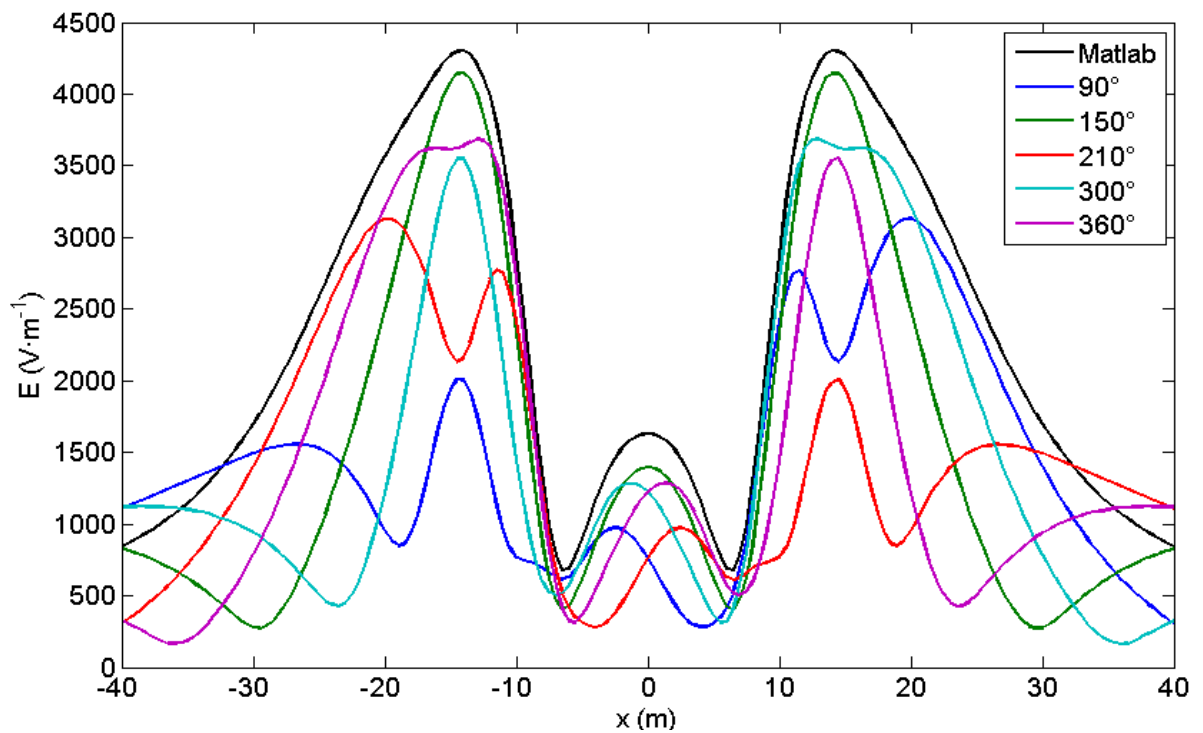
Hranice modelované oblasti byla zvolena ve tvaru obdélníka, přičemž vzdálenost hranice od osy stožáru činila 80 m a vzdálenost od země 120 m. Při takto nadefinované oblasti nebylo pole nijak deformováno. Numerický výpočet byl proveden pro minimální výšku fázových vodičů nad zemí za stejných podmínek jako při analytickém výpočtu. Výsledkem jsou grafy rozložení intenzity elektrického pole 1,8 m nad zemí s pěti průběhy reprezentující jednotlivé časové okamžiky. Pro porovnání je každý graf doplněn výslednou křivkou analytického výpočtu. Pro snadnější orientaci ve vykreslených grafech byly modelovány takové konfigurace stožárů, které byly při analytickém výpočtu symetrické dle osy y. Jedná se tedy o 2. konfiguraci stožáru D-type, 3. konfiguraci stožáru Donau a 5. konfiguraci pro oba stožáry Soudek a pro stožár Vertical.

**Stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně stožáru**

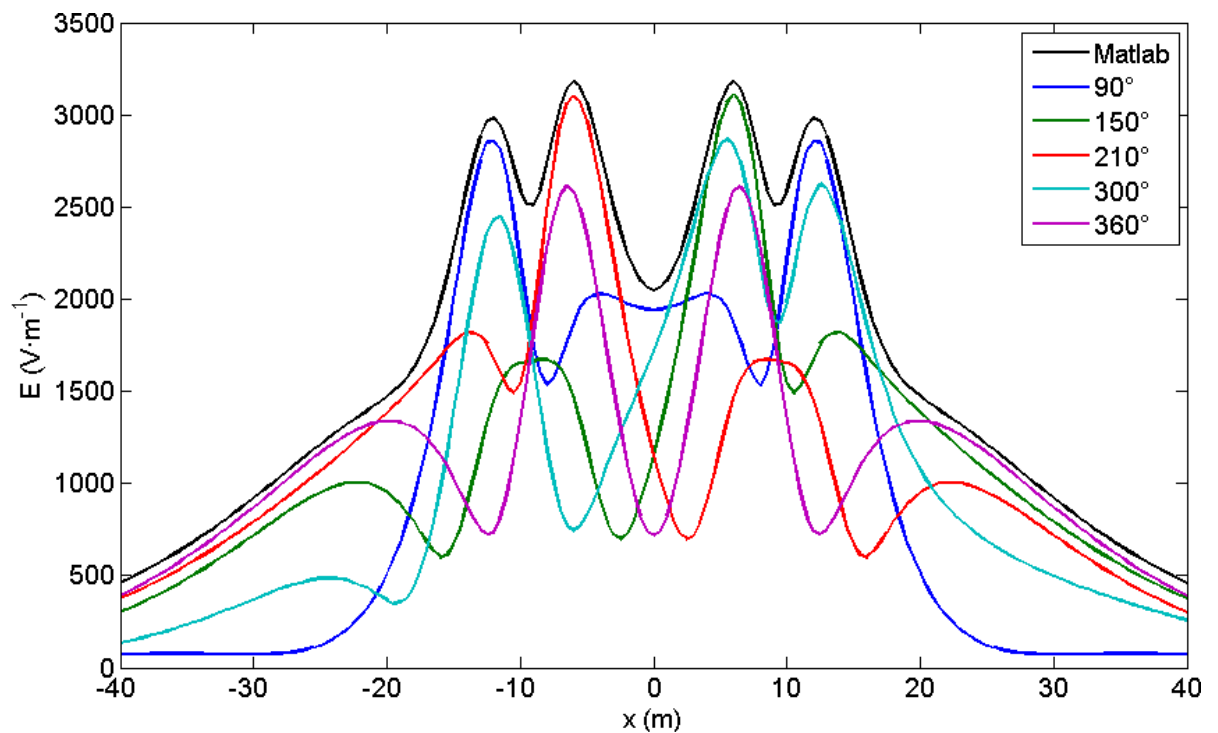
Obr. 25: Graf intenzity elektrického pole pro stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně vypočtené analyticky a numericky pro konkrétní časové okamžiky

**Stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce**

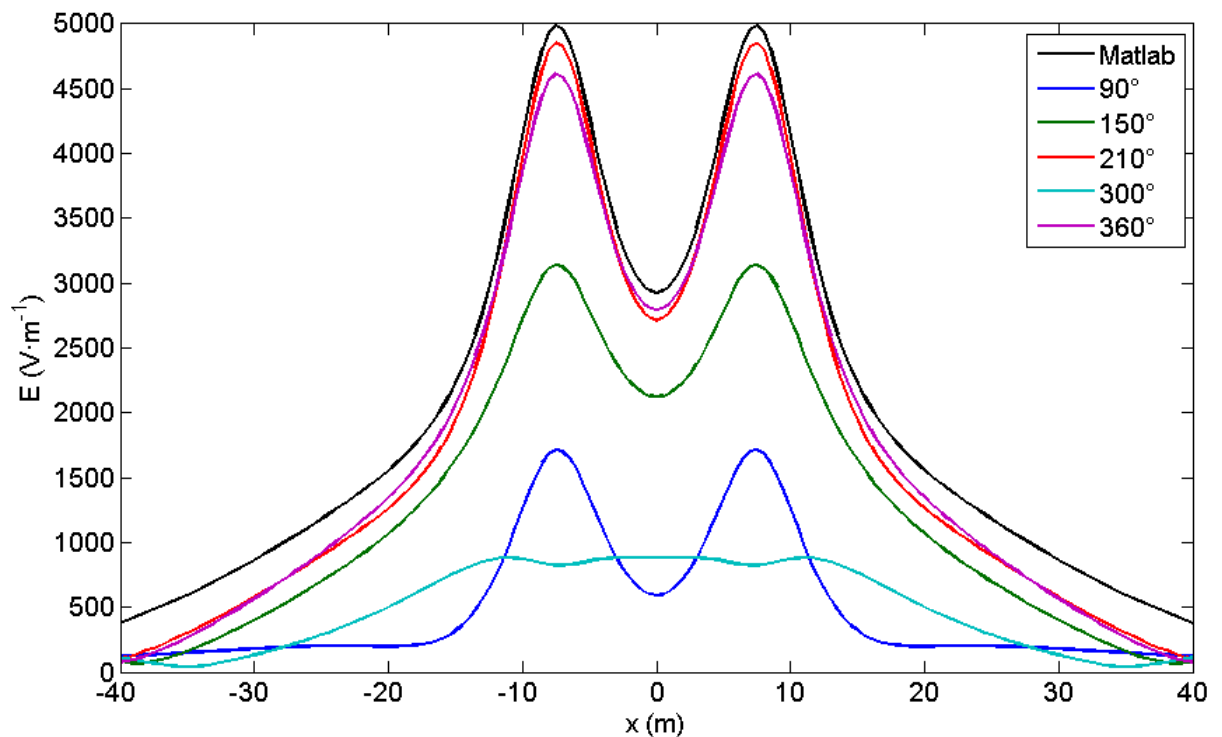
Obr. 26: Graf intenzity elektrického pole pro stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožáru vypočtené analyticky a numericky pro konkrétní časové okamžiky

**Stožár Donau**

Obr. 27: Graf intenzity elektrického pole pro stožár Donau vypočtené analyticky a numericky pro konkrétní časové okamžiky

**Stožár D-type**

Obr. 28: Graf intenzity elektrického pole pro stožár D-type vypočtené analyticky a numericky pro konkrétní časové okamžiky

**Stožár Vertical**

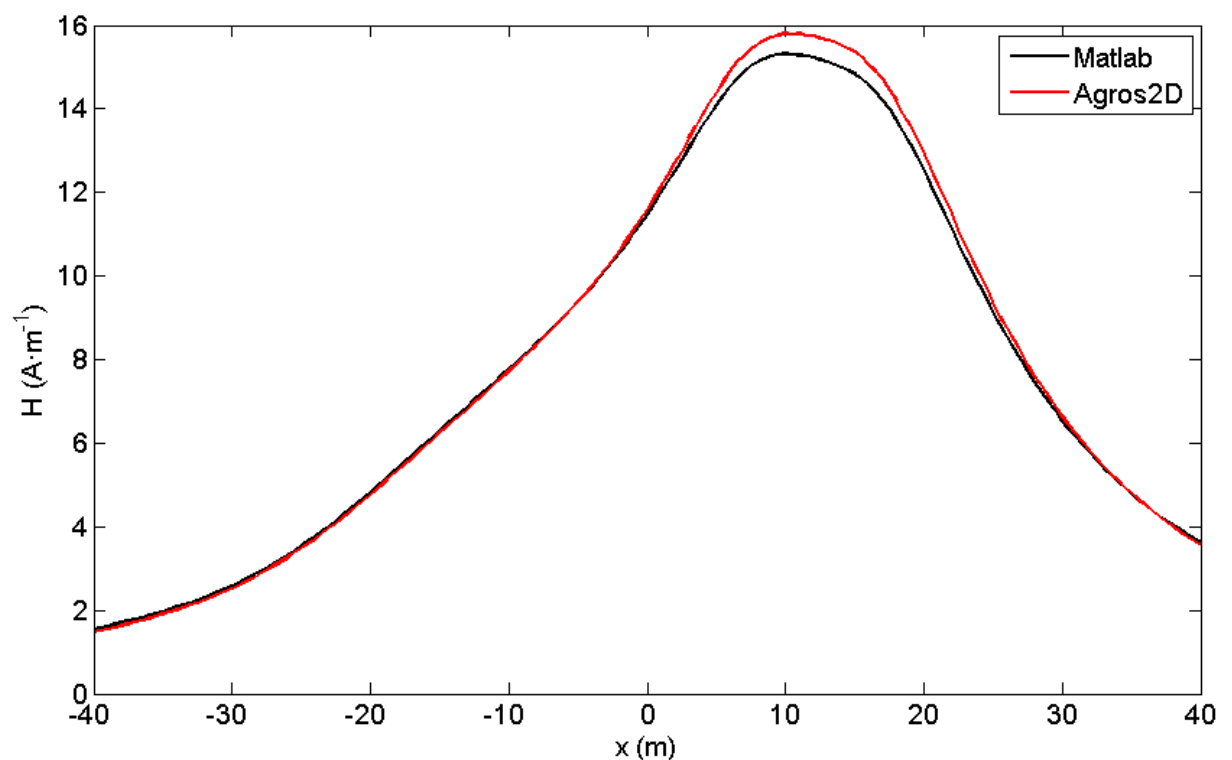
Obr. 29: Graf intenzity elektrického pole pro stožár Vertical vypočtené analyticky a numericky pro konkrétní časové okamžiky

Velikost elektrických intenzit vypočtených numericky v jednotlivých časových okamžicích nepřekročila ani v jednom grafu výslednou střední hodnotu elektrické intenzity vypočtenou analyticky. Vzhledem k tomu, že u všech stožárů byly prověřovány symetrické konfigurace fází, byly i křivky elektrické intenzity pro dané časové okamžiky symetrické. Výjimku tvoří graf na obr. 26, kde nesymetrii tvoří vyšší napěťová hladina na jedné straně stožáru. Při detailnějším prozkoumání na první pohled nepřehledných grafů pro stožáry Donau a D-type (obr. 28 a 29) zjistíme, že křivky reprezentující časové okamžiky 150° a 210° popřípadě 300° a 360° jsou také navzájem symetrické.

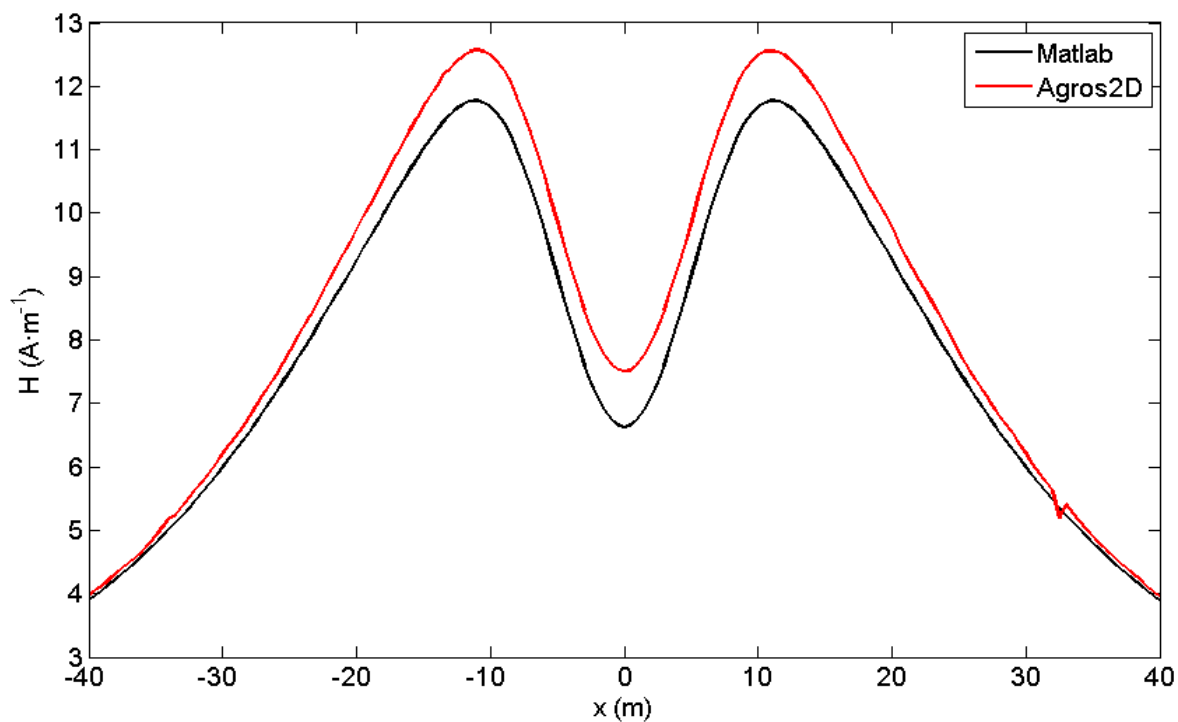
## 6.2 Simulace rozložení magnetického pole

Na rozdíl od elektrického pole umožňuje program Agros2D harmonickou analýzu magnetického pole. Problém rozložení magnetického pole se řeší v rovině x-y jako okrajová úloha pro vektorový magnetický potenciál  $A$ . Hranice je podobně jako u elektrického pole volena obdélníkového tvaru. Na základě doporučení [11] byla spodní hranice posunuta o 80 m níže, aby se zamezilo možné deformaci y-ové složky intenzity magnetického pole. V celé vyšetřované oblasti byl předpokládán vzduch. Numerický výpočet byl proveden pro minimální výšku fázových vodičů nad zemí za stejných podmínek jako při analytickém výpočtu. Pro numerický výpočet byla na základě analytického výpočtu zvolena nejnejpříznivější 5. konfigurace fází pro všechny stožáry. Výsledkem jsou grafy rozložení intenzity magnetického pole 1,8 m nad zemí doplněné opět o průběh vypočtený analyticky.

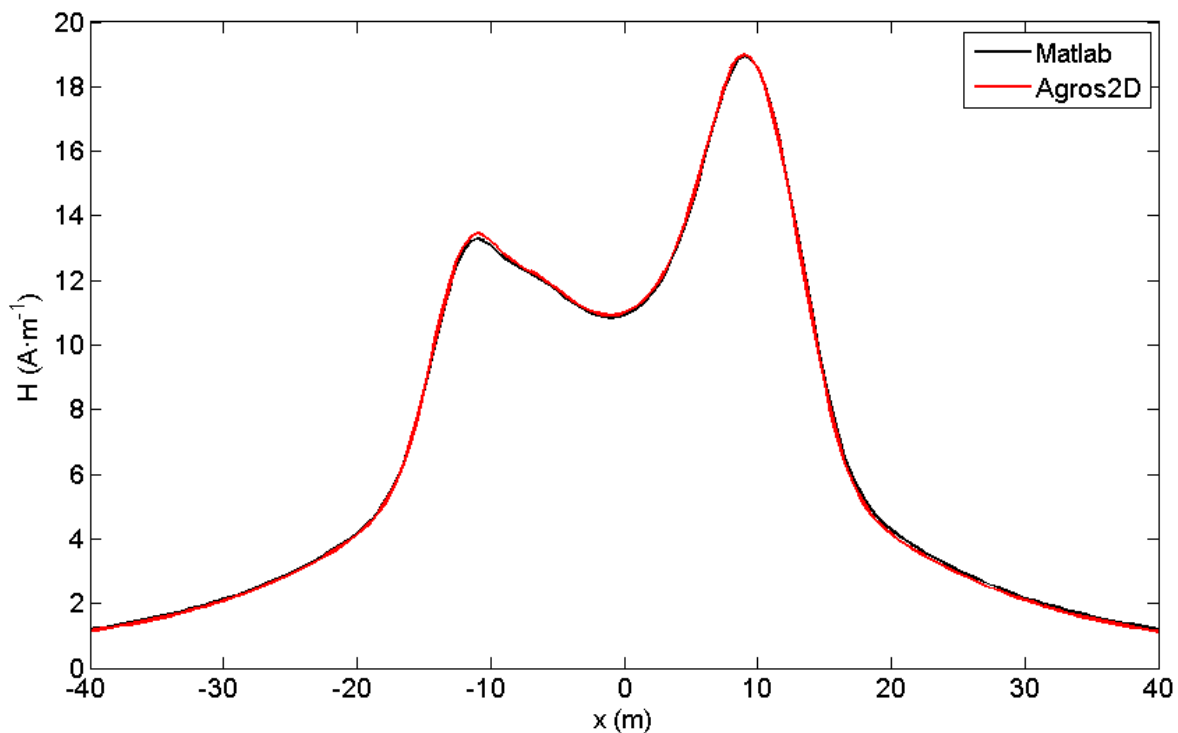
### Stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně stožáru



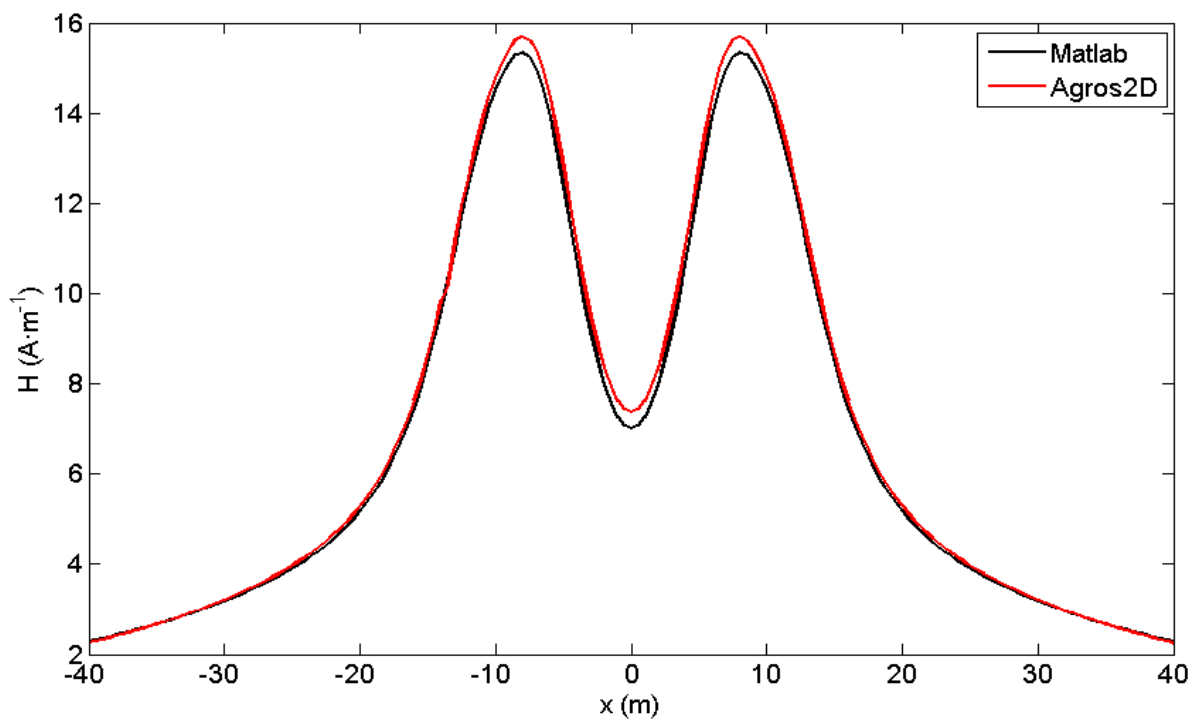
Obr. 30: Graf intenzity magnetického pole pro stožár Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně vypočtené analyticky a numericky

**Stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce**

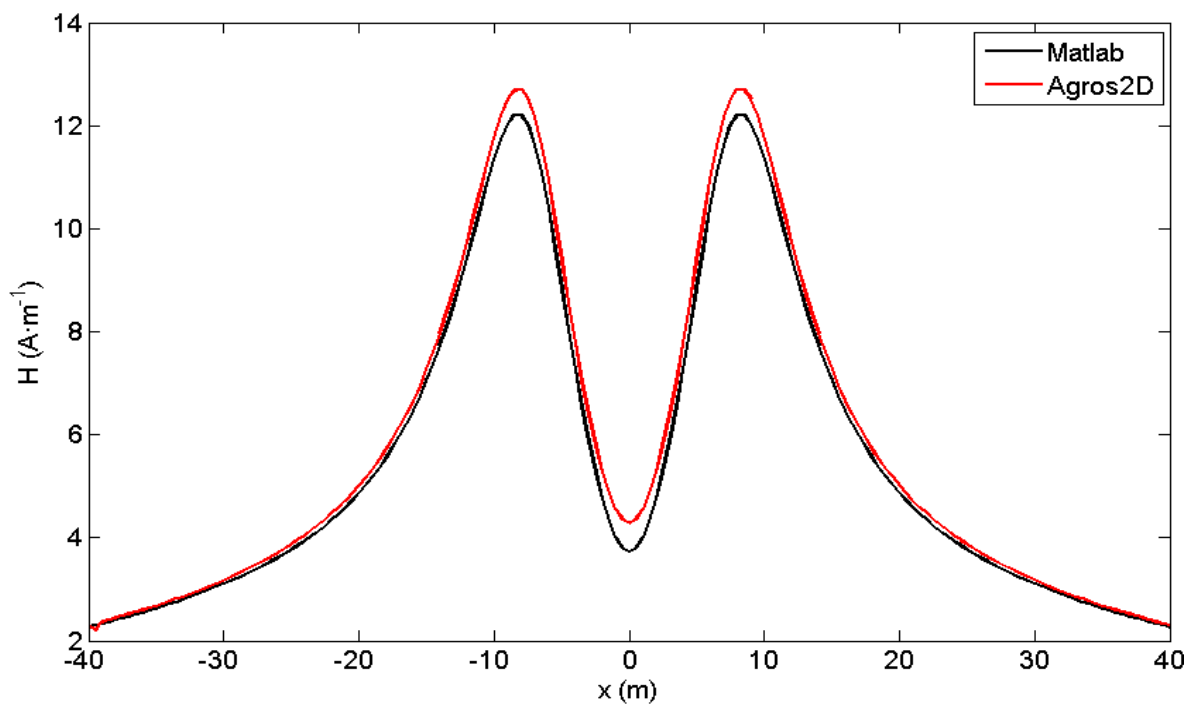
Obr. 31: Graf intenzity magnetického pole pro stožár Soudek s vedením DS po vnější straně stožárové konstrukce vypočtené analyticky a numericky

**Stožár Donau**

Obr. 32: Graf intenzity magnetického pole pro stožár Donau vypočtené analyticky a numericky

**Stožár D-type**

Obr. 33: Graf intenzity magnetického pole pro stožár D-type vypočtené analyticky a numericky

**Stožár Vertical**

Obr. 34 Graf intenzity magnetického pole pro stožár Vertical vypočtené analyticky a numericky

Křivky rozložení magnetického pole vypočtené numericky se tvarem shodují s rozložením získaným analytickým výpočtem. Téměř u všech grafů křivka reprezentující numerický výpočet nepatrně překročila křivku analytického výpočtu. Největší rozdíl byl zaznamenán u stožáru Soudek s vedením DS po vnější straně (obr. 32). Naprosto shodný průběh byl zaznamenán u stožáru Donau (obr. 33). I přes drobné nepřesnosti lze výpočet považovat za správný a přesný.



## 7 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem sdružených vedení pro ČR, který spočíval ve vhodném výběru tvaru stožárové konstrukce a následném výpočtu vzájemného ovlivňování vedení a rozložení elektromagnetického pole v jeho okolí. Pro výpočet bylo vybráno pět stožárových konstrukcí s vedením 2x400 kV a 2x110 kV, z nichž některé jsou již využívány ve světě.

Na výsledek výpočtu má z důvodu možné kompenzace účinků elektrického či magnetického pole velký vliv uspořádání fází jednotlivých vedení. Vzhledem k velkému počtu možností jak vodiče uspořádat byl nejprve proveden výpočet 36 nejpříznivějších a nejnepříznivějších rozložení elektromagnetického pole na základě [11]. Následně bylo z těchto 36 rozložení vybráno 5 uspořádání, které jsou prezentovány v této práci. Výpočet byl proveden pro základní výšku vodičů danou konstrukcí stožáru a pro minimální výšku vodičů danou normou ČSN EN 50 341-1. Při posuzování rozložení elektromagnetického pole se vycházelo z hygienických norem předepisující maximální intenzitu elektrického pole  $10 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$  a maximální magnetickou indukci 0,5 mT ve výšce 1,8 m nad zemí. Proto i všechny grafy rozložení elektrického či magnetického pole byly vykresleny pro výšku 1,8 m nad zemí v rozsahu 40 m na obě strany od osy stožáru.

Výsledky analytického výpočtu byly ověřeny numerickým výpočtem v programu Agros2D. Protože program Agros2D neumožňuje řešit harmonické elektrické pole, byl opakovaně proveden výpočet elektrostatického pole pro pět časových okamžiků během jedné periody. Numerický výpočet magnetického pole odpovídal analytickému výpočtu.

Maximální magnetická indukce 0,5 mT daná normou, nebyla překročena ani u jednoho ze stožárů. Maximální povolenou hodnotu intenzity elektrického pole  $10 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$  překročily konfigurace obou stožárů Soudek pro minimální výšku. Nejhorší rozložení elektrického pole měl stožár Soudek s vedením distribuční soustavy na jedné a přenosové soustavy na druhé straně stožárové konstrukce. Pro minimální výšku přesahovalo limit elektrické intenzity všech pět konfigurací. U druhého stožáru Soudek s vedením distribuční soustavy po vnější straně stožárové konstrukce přesáhly limit pro minimální výšku vodičů 3., 4. a 5. konfigurace. Pro přijatelné rozložení intenzit elektrického pole obou stožárů by bylo nutné zajistit zvýšení alespoň o 2 m. Je však nutné podotknout, že minimální výška je nejmenší možná výška, kterou povolují normy. V realitě se s největší pravděpodobností s tak velkým průhybem

fázových vodičů, s jakým bylo počítáno ve výpočtu, nesetkáme. Využití stožáru Soudek s vedením DS na jedné a PS na druhé straně stožáru přichází v úvahu pouze při dlouhodobém nevyužívání jedné strany stožáru již postaveného vedení. Avšak pro výstavbu nového sdruženého vedení se ani jeden ze stožárů Soudek z důvodu nepříznivého rozložení elektrického pole nehodí.

Stožáry SDV s vedením přenosové soustavy nad vedením soustavy distribuční vykazovaly oproti stožárům tvaru Soudek mnohem příznivější rozložení elektrického pole. U stožárů Donau a D-type dochází zároveň vlivem složitějšího geometrického uspořádání k mnohem větším kompenzacím elektrického pole než u ostatních stožárů. Všechny tři stožáry (Donau, D-type a Vertical) z hlediska rozložení elektrického pole vyhovují. Stožáry D-type a Vertical nepřesáhly svým rozložením elektrické intenzity ani hodnotu  $5 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ . Z tohoto důvodu byl proveden výpočet rozložení elektrického pole minimální výšky obou stožárů pro napěťové hladiny 4x400 kV. Při vzájemném porovnání stožárů poté vykazoval příznivější hodnoty elektrické intenzity stožár D-type. Oba dva stožáry jsou již kvůli své celkové výšce (78,5 m) vhodné spíše pro vyšší napěťové hladiny (např.: 2x220 kV a 2x400 kV nebo 4x400 kV). Oproti tomu stožár Donau sice vykazuje větší hodnoty intenzity elektrického pole než stožáry D-type a Vertical, ale jeho celková výška činí pouze 52 m. Z tohoto důvodu a z dalších důvodů, jako jsou vhodné rozložení elektrického pole a možnost jeho vzájemné kompenzace, se pro sdružené vedení realizované přenosovou soustavou ČR nejvíce hodí stožár Donau.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Sdružené vedení v podmínkách ČEPS
- [2] Technická infrastruktura. *Činnost ČEPS a. s.* [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Default.aspx>
- [3] Procházka, Radek. Stožáry VVN (III): Konstrukční řešení stožárů. *Stožáry VVN* [online]. 2007, [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4192-stozary-vvn-iii>
- [4] Feng, Guihong, Yanxin Wang a Bingyi Zhang: *Study on Electromagnetic Environment of Multi-circuit Transmission Lines on Same Tower*. 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference. IEEE, 2008
- [5] Weidong L., Kun L., Mingjiu P. a Gang X: *Research on electromagnetic character of 500/220kV mixed-voltage quadruple-circuit transmission line*. 2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEE, 2013
- [6] Halamay, D.; Saxby, K.; Bala, J.; Spacek, R.: *Feasibility study of a high-voltage DC & AC multi-circuit hybrid transmission line*, Power Symposium, 2005. Proceedings of the 37th Annual North American , 2005
- [7] Novitskiy, A.; D. Westermann: *Interaction of multi-circuit overhead transmission lines of different voltages located on the same pylons*. 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability. IEEE, 2012.
- [8] Mayer, D., Polák, J.: *Metody řešení elektrických a magnetických polí*, SNTL, Praha, 1983
- [9] Benešová, Z., Šroubová, L.: *Capacitive Coupling in Double-Circuit Transmission Lines*, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Žilina 2004
- [10] Benešová, Z., Beran, M., Šroubová, L.: *Reduction of Electric and Magnetic Field of Double-Circuit Overhead Lines*, AMTEE 2003, Plzeň, 2003
- [11] Nazarčík, T. *Vyšetření elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení*. Bakalářská práce, ZČU Plzeň, 2012
- [12] Kolektiv autorů: *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*, AEM, Praha, 2013

- [13] ČSN EN 50 341-1 *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV*
- [14] ČSN 33 2040 *Ochrana před účinky elektromagnetického pole 50 Hz v pásmu vlivu zařízení elektrizační soustavy*
- [15] Abclinuxu [Cit. 24. 5. 2015] Dostupné z: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2D-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>

## Přílohy

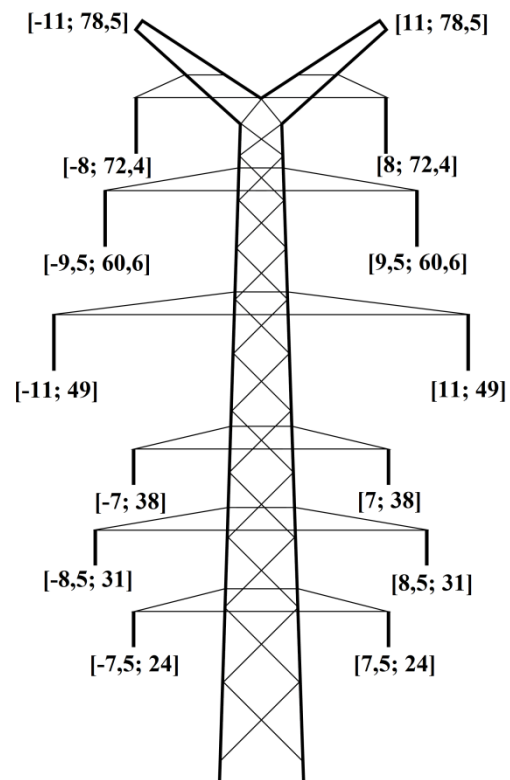
### Příloha A



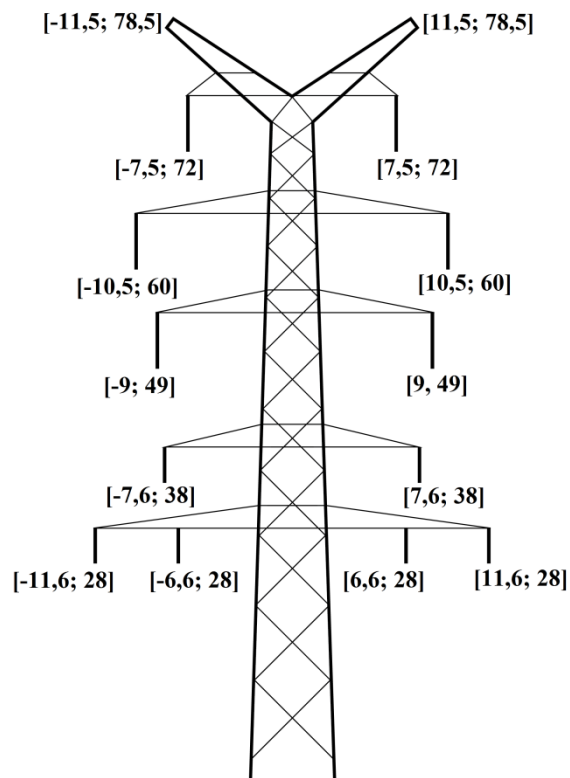
*Obr. A1: Stožár Donau pro SDV – Německo*



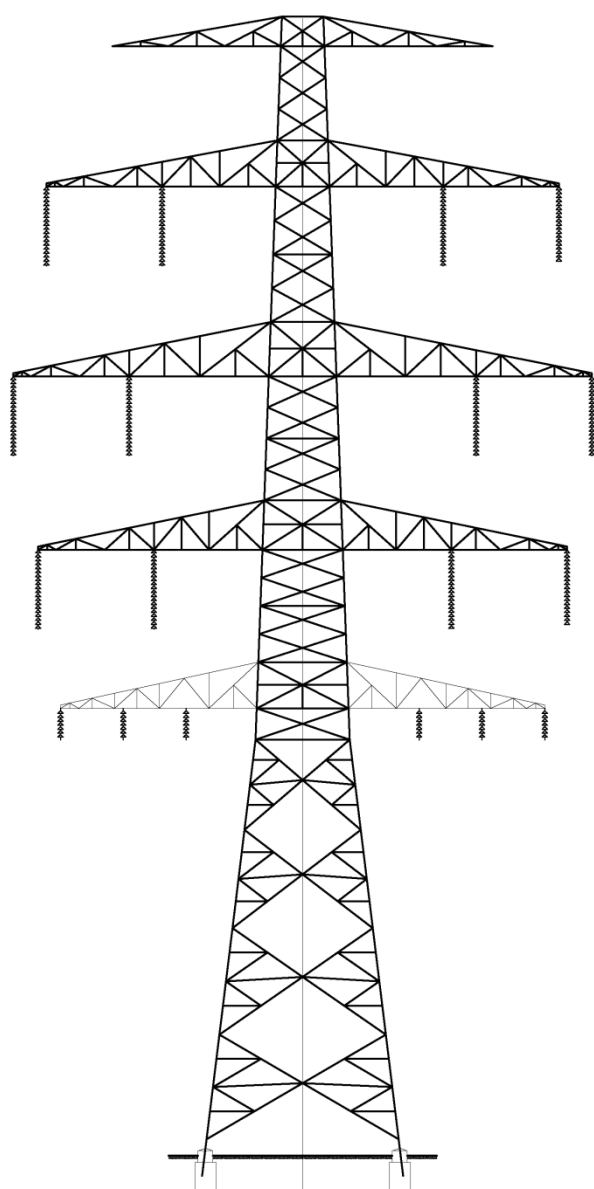
*Obr. A2: Stožár Vertical pro SDV – Čína*



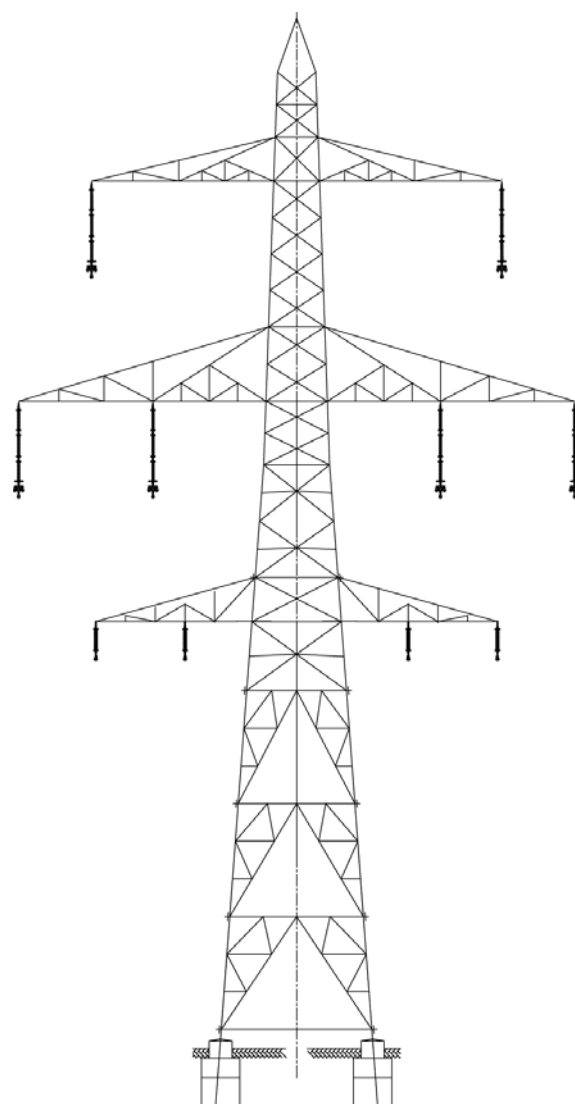
Obr. A3: Stožár Vertical pro SDV s vedením PS nad vedením DS [5]



Obr. A4: Stožár D-type pro SDV s vedením PS nad vedením DS [5]



Obr. A5: Stožár Soudek 4x400 kV a 2x110 kV [1]



Obr. A6: Stožár Soudek pro SDV o různých frekvencích 2x380 kV pro  $f=50$  Hz a 2x110 kV pro 16,66 Hz [7]

## Příloha B

### Elektrotechnické normy a předpisy

Norma ČSN EN 50 341-1 [13] definuje kromě základních elektrických požadavků na ES také dva základní typy nejkratších elektrických vzdáleností  $D_{el}$  a  $D_{pp}$  pro zamezení přeskočení. Vzdálenost  $D_{el}$  je definována jako nejkratší vzdušná vzdálenost požadovaná pro zamezení výboje mezi vodiči a objekty na potenciálu země při přepětích s rychlým nebo s pomalým čelem. Vzdálenost  $D_{pp}$  je definována stejně jako vzdálenost  $D_{el}$ , ale týká se nejkratší vzdálenosti mezi fázovými vodiči. V normě se pro odvození vzdáleností  $D_{el}$  a  $D_{pp}$  používají dvě metody – metoda založená na zkušenosti a metoda založená na teoretickém výpočtu. V Evropě jsou dobré zkušenosti s užitím hodnot  $D_{el}$  a  $D_{pp}$  uvedených v následující tabulce

Tab. B1: Základní elektrické vzdálenosti

Jmenovité napětí sítě $U_N$ (kV)	Největší napětí sítě $U_s$ (kV)	$D_{el}$ (m)	$D_{pp}$ (m)
110	123	1,00	1,15
220	245	1,70	1,85
400	420	2,80	3,20

Z  $D_{el}$  se vypočítává nejkratší vnější vzdálenost od země. Vzdálenost vedení od země se liší na základě terénu či oblasti v okolí vedení.

Tab. B2: Nejkratší vnější vzdálenosti od země

Oblast	Nejkratší vzdálenost od země (m)
skalnatý nebo strmý svah	$2+D_{el}$ (min. 3 m)
běžný profil země	$5+D_{el}$
křižování pozemní komunikace	$6+D_{el}$
všeobecné sportovní plochy	$7+D_{el}$

Norma ČSN 33 2040 [14] z roku 1993 stanovuje požadavky na úroveň intenzity elektromagnetického pole 50 Hz v okolí zařízení ES.

Norma definuje pásma vlivu elektrického a magnetického pole od zařízení ES. Jako pásmo vlivu elektrického pole se uvažuje prostor v okolí zařízení, kde je elektrická intenzita ve výšce 1,8 m nad zemí vyšší než  $1 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ . Pásmo vlivu magnetického pole je prostor v okolí zařízení ES, kde je magnetická indukce vyšší než 0,1 mT. Trvale obývané objekty, které se nacházejí v blízkosti zařízení ES, musí být mimo tato pásma.



Přípustná úroveň intenzity elektrického pole v okolí obecně přístupných zařízení elektrizační soustavy je  $10 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$  ve výši 1,8 m nad zemí. V pásmu vlivu elektroenergetických zařízení v prostorách přístupných osobám nesmí být magnetická indukce vyšší než 0,5 mT.

V okolí zařízení ES 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  $15 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ . Při překročení intenzity elektrického pole  $15 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ , nesmí délka pobytu osob přesáhnout při intenzitě elektrického pole do  $20 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$  1,5 hodiny denně, popřípadě při intenzitě elektrického pole do  $25 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$  0,5 hod denně. Při pobytu osob v elektrickém poli o intenzitě vyšší než  $15 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$  a delším než 1,5 hod denně, musí být užitá přenosná skupinová stínění nebo individuální stínící obleky.