

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Živé organismy pod vlivem elektromagnetického pole  
nadzemních vedení**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kateřina ČERNÁ**  
Osobní číslo: **E10B0525P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Živé organismy pod vlivem elektromagnetického pole nadzemních 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. Prostudujte potřebnou literaturu, normy a vyhlášky a zjistěte nejvyšší přípustné hodnoty uvedených veličin elektrického a magnetického pole.
2. Vysvětlete problém elektromagnetické kompatibility elektrických a biologických systémů a uveďte pozitiva a negativa působení elektromagnetického pole na živý organismus.
3. Řešte elektrické a magnetické pole v okolí venkovních vedení vvn a vn pro nejběžněji používané konfigurace vodičů.
4. Porovnejte zjištěné hodnoty s maximálními přípustnými hodnotami.
5. Zhodnoťte současné znečištění životního prostředí elektromagnetickým polem a navrhněte řešení do budoucna.

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


1. Mayer, Daniel: Teorie elektromagnetického pole, Plzeň, ZČU v Plzni, 2001.
2. Míka, S., Příkryl, P., Brandner, M.: Speciální numerické metody. Numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice, Plzeň, Vydavatelský servis, 2006.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lenka Šroubová  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012  
Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem elektromagnetického pole venkovních vedení na živé organismy. Ve své práci jsem pomocí programu Agros2D namodelovala elektromagnetické pole v blízkosti stožáru pro napětí 110 kV a pro stožár pro napětí 400 kV. Výsledné hodnoty jsem porovnála s maximálními dovolenými hodnotami uvedenými v nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.

## **Klíčová slova**

elektromagnetická kompatibilita, biologické účinky elektromagnetického pole, stožár venkovního vedení, magnetické pole v okolí venkovních vedení, elektrické pole v okolí venkovních vedení

**Abstract**

This Bachelor's thesis deals with the influence of the electromagnetic field of overhead lines on living organisms. In my work I used Agros2D to model electromagnetic fields near the transmission tower for voltages of 110 kV and for voltages of 400 kV. The resulting values were compared with the maximum permissible values specified in Government Regulation No. 1/2008 Coll., On health protection against non-ionizing radiation.

**Key words**

electromagnetic compatibility, biological effects of electromagnetic fields, transmission tower, the magnetic field in the vicinity of overhead lines, the electric field in the vicinity of overhead lines

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

## **Poděkování**

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucí bakalářské práce Ing. Lence Šroubové, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracovávání této bakalářské práce.

## Obsah

Obsah.....	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
Seznam symbolů a zkratk.....	11
1 Úvod.....	12
2 Elektromagnetické pole.....	14
2.1 Základní vlastnosti.....	14
3 Elektromagnetická kompatibilita elektrických a biologických systémů.....	16
3.1 Elektromagnetická kompatibilita elektrických systémů.....	16
3.2 Elektromagnetická kompatibilita elektrických systémů.....	16
4 Biologické účinky elektromagnetického pole.....	17
4.1 Tepelné účinky elektromagnetického pole.....	18
4.2 Netepelné účinky elektromagnetického pole.....	18
4.3 Využití elektromagnetického pole v medicíně.....	19
4.3.1 Magnetická rezonance.....	19
4.3.2 Elektroencefalografie EEG.....	20
4.3.3 Elektromyografie EMG.....	20
4.3.4 Elektrokardiografie EKG.....	20
4.4 Biologické účinky nízkofrekvenčních polí.....	21
4.4.1 Účinky nízkofrekvenčního elektrického pole.....	21
4.4.2 Ochrana před střídavým elektrickým polem.....	21
4.4.3 Účinky nízkofrekvenčního magnetického pole.....	22
4.4.4 Ochrana před střídavým magnetickým polem.....	22
5 Nadzemní vedení.....	22
5.1 Stožáry venkovních vedení.....	23
5.2 Typy stožárů.....	24
6 Modelování elektrického a magnetického pole programem Agros2D.....	25
6.1 Agros2D.....	25
6.2 Modelování magnetického pole.....	27
6.2.1 Magnetické pole u stožárů typu Soudek a Dvojitý portál ve výšce 1,5 metru nad zemí.....	29
6.2.2 Magnetické pole u stožárů typu Soudek a Dvojitý portál v minimální výšce dolních vodičů od země.....	32
6.3 Modelování elektrického pole.....	35
6.3.1 Elektrické pole u stožárů typu Soudek a Dvojitý portál ve výšce 1,5 metru nad zemí.....	37
6.3.2 Elektrické pole u stožárů typu Soudek a Dvojitý portál v minimální výšce dolních vodičů od země.....	40
6.4 Zkrat na vedení.....	43
7 Závěr.....	45
Použitá literatura.....	47
Přílohy.....	50



## Seznam obrázků

<b>Obr. 5.1</b> Části konstrukce stožárů – ukázáno na typu stožáru Kočka.....	23
<b>Obr. 5.2</b> Kotevní stožár typu Dvojitý portál.....	24
<b>Obr. 5.3</b> Stožár typu Soudek – varianta a) nosný, varianta b) kotevní.....	25
<b>Obr. 6.1</b> Práce se značkami oblastí v programu Agros2D.....	26
<b>Obr. 6.2</b> Vytvoření výpočetní sítě v programu Agros2D .....	26
<b>Obr. 6.3</b> Barevná mapa intenzity elektrického pole v blízkosti vodiče.....	27
<b>Obr. 6.4</b> Graf průběhu intenzity magnetického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v 1,5 metru nad zemí.....	30
<b>Obr. 6.5</b> Graf průběhu magnetické indukce pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v 1,5 metru nad zemí.....	30
<b>Obr. 6.6</b> Graf průběhu magnetické indukce pro různé konfigurace fází u stožáru typu Dvojitý portál v 1,5 metru nad zemí.....	31
<b>Obr. 6.7</b> Graf průběhu magnetické indukce pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v minimální výšce dolních vodičů od země.....	33
<b>Obr. 6.8</b> Graf průběhu magnetické indukce pro různé konfigurace fází u stožáru typu Dvojitý portál v minimální výšce dolních vodičů od země.....	34
<b>Obr. 6.9</b> Rozložení potenciálových koeficientů.....	36
<b>Obr. 6.10</b> Graf průběhu intenzity elektrického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v 1,5 metru nad zemí.....	38
<b>Obr. 6.11</b> Graf průběhu intenzity elektrického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Dvojitý portál v 1,5 metru nad zemí.....	39
<b>Obr. 6.12</b> Graf průběhu intenzity elektrického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v minimální výšce dolních vodičů od země.....	41
<b>Obr. 6.13</b> Graf průběhu intenzity elektrického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Dvojitý portál v minimální výšce dolních vodičů od země.....	42
<b>Obr. 6.14</b> Graf průběhu magnetické indukce při zkratu u stožáru Soudek.....	43
<b>Obr. 6.15</b> Graf průběhu magnetické indukce při zkratu u stožáru Dvojitý portál.....	44

## Seznam tabulek

<b>Tab. 6.1</b> Konfigurace fází pro stožár typu Soudek a maximální hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole v 1,5 metru nad zemí.....	29
<b>Tab. 6.2</b> Konfigurace fází pro stožár typu Dvojité portál a maximální hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole v 1,5 metru nad zemí.....	31
<b>Tab. 6.3</b> Konfigurace fází pro stožár typu Soudek a maximální hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole v minimální výšce dolních vodičů od země.....	32
<b>Tab. 6.4</b> Konfigurace fází pro stožár typu Dvojité portál a maximální hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole v minimální výšce dolních vodičů od země.....	34
<b>Tab. 6.5</b> Konfigurace fází pro stožár typu Soudek a maximální hodnoty intenzity elektrického pole v 1,5 metru nad zemí.....	37
<b>Tab. 6.6</b> Konfigurace fází pro stožár typu Dvojité portál a maximální hodnoty intenzity elektrického pole v 1,5 metru nad zemí.....	38
<b>Tab. 6.7</b> Konfigurace fází pro stožár typu Soudek a maximální hodnoty intenzity elektrického pole v minimální výšce dolních vodičů od země.....	40
<b>Tab. 6.8</b> Konfigurace fází pro stožár typu Dvojité portál a maximální hodnoty intenzity elektrického pole v minimální výšce dolních vodičů od země.....	42

## Seznam symbolů a zkratk

EMP	Elektromagnetické pole	
EMC	Elektromagnetická kompatibilita	
WHO	World Health Organisation	
ICNIRP	International Commission on Non-Ionising Radiation Protection	
nn	Nízké napětí	
vn	Vysoké napětí	
vvn	Velmi vysoké napětí	
<b><i>E</i></b>	Intenzita elektrického pole	[V/m]
<b><i>H</i></b>	Intenzita magnetického pole	[A/m]
<b><i>D</i></b>	Elektrická indukce	[C/m <sup>2</sup> ]
<b><i>B</i></b>	Magnetická indukce	[T]
<b><i>S</i><sub>př</sub></b>	Přirozený výkon	[VA]
<b><i>I</i></b>	Proud	[A]
<b><i>U</i></b>	Napětí	[V]
<b><i>J</i></b>	Proudová hustota	[A/m <sup>2</sup> ]
<b><i>S</i></b>	Průřez	[m <sup>2</sup> ]
<b><u><i>A</i></u></b>	Matice potenciálových koeficientů	
<b><u><i>Q</i></u></b>	Matice nábojů na jednotlivých vodičích	
<b><u><i>B</i></u></b>	Matice kapacitních koeficientů	
<b><u><i>U</i></u></b>	Matice napětí na jednotlivých fázích	
<b><i>d</i></b>	Vzdálenost mezi dvěma vodiči	[m]
<b><i>b</i></b>	Vzdálenost mezi vodičem a obrazem 2. vodiče	[m]
<b><i>α</i><sub>ii</sub></b>	Vlastní potenciálový koeficient	[V/C]
<b><i>α</i><sub>ij</sub></b>	Vzájemný potenciálový koeficient	[V/C]
<b><i>β</i><sub>ij</sub></b>	Koeficient elektrostatické indukce vodiče <i>i</i> na vodič <i>j</i>	[F/m]
<b><i>x</i></b>	Vzdálenost od stožáru	[m]
<b><i>A</i></b>	Vektorový magnetický potenciál	[Wb/m]
<b><i>γ</i></b>	Elektrická vodivost	[S/m]
<b><i>μ</i><sub>r</sub></b>	Relativní permeabilita	[-]
<b><i>J</i><sub>ext</sub></b>	Vnější proudová hustota	[A/m <sup>2</sup> ]

---

$\varepsilon$	Permitivita prostředí	[F/m]
$\mu$	Permeabilita prostředí	[H/m]
$\rho$	Hustota náboje	[C/m <sup>3</sup> ]
$\psi$	Elektrický indukční tok	[C]
$\phi$	Magnetický indukční tok	[Wb]

# 1 Úvod

Živé organismy jsou již od počátku ovlivňovány přirozenými elektromagnetickými poli. Tato pole mají svou příčinu v slunečních erupcích a atmosférických jevech, kterými jsou například blesky. Život na Zemi se na tato elektromagnetická pole adaptoval. Avšak člověk během minulého století vytvořil umělá elektromagnetická pole, která se od pole přirozeného liší vlnovou délkou, koherencí i frekvencí.

S rozvojem informačních bezdrátových technologií a s nárůstem spotřeby energií dochází ke zvýšení počtu zdrojů elektromagnetického pole.

Obyčejný člověk je ve svém běžném životě denně vystavován účinkům elektromagnetického pole a to nejen v zaměstnání, ale i doma. Mezi zdroje záření, se kterými jsme v každodenním kontaktu, patří například: televizory, elektrické domácí spotřebiče, hračky na dálková ovládání, mobilní telefony, bezdrátový internet a mnoho dalších. Dalšími zdroji elektromagnetického záření, v jejichž blízkosti se nacházíme každý den, jsou rozvodné sítě, vedení či trafostanice.

Se zvyšující se úrovní elektromagnetického záření vznikl termín elektrosmog. Pojmem elektrosmog se rozumí ovlivňování člověka zdroji elektromagnetického záření, kterému nebyl předtím vystaven.

Negativní účinky elektromagnetického pole na živý organismus dosud nejsou prokázány. Zejména se diskutuje o vlivu elektromagnetického pole na vznik rakoviny, především pak leukemie. Ani normy, které stanovují maximální hodnoty elektromagnetického pole, nejsou jednotné.

Elektromagnetické pole nemá jen negativní účinky. Celé spektrum elektromagnetického pole se využívá v medicíně, především pak při léčení nádorových onemocnění – radioterapii. Dále pak při magnetické rezonanci.

V mé práci se budu zabývat vlivem elektromagnetického pole nadzemních vedení na člověka. Pomocí simulace a výpočtu reálného vedení určím hodnotu elektromagnetického pole a tu pak porovná s hodnotami z nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, které bylo dne 29.3.2010 aktualizováno.

## 2 Elektromagnetické pole

### 2.1 Základní vlastnosti

Elektromagnetické pole je fyzikální pole složené z elektrického a magnetického. Tyto dvě pole se navzájem ovlivňují. Elektromagnetické pole je určeno lokálními veličinami: intenzitou elektrického a magnetického pole a elektrickou a magnetickou indukcí [4].

Řešení elektromagnetických polí z makroskopického hlediska je prováděno pomocí Maxwellových rovnic. Tyto rovnice ve svém integrálním tvaru popisují elektromagnetické pole v určité oblasti. Ve svém diferenciálním tvaru pouze v jednom bodě (v tzv. regulárním bodě) z této oblasti. Regulární bod je takový bod, ve kterém jsou uvedené veličiny spojité a spojitě diferencovatelné funkce.

Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru:

#### I. Maxwellova rovnice (zákon celkového proudu, zobecněný Ampérův zákon)

Cirkulace vektoru intenzity magnetického pole  $H$  po uzavřené křivce  $c$  je rovna součtu celkového a posuvného proudu. Křivka  $c$  obepíná plochu  $S$  a obě jsou orientovány pravotočivě.

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d\psi}{dt} \quad (2.0)$$

#### II. Maxwellova rovnice (Faradayův indukční zákon)

Cirkulace vektoru intenzity elektrického pole  $E$  po uzavřené křivce  $c$  je rovna záporné derivaci magnetického indukčního toku.

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

#### III. Maxwellova rovnice

Elektrický indukční tok  $D$  plochou  $S$  je roven celkovému náboji  $Q$ , který je v této ploše.

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (2.2)$$

**IV. Maxwellova rovnice**

Magnetický indukční tok  $B$  plochou  $S$  je roven 0.

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (2.3)$$

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru:

**I. Maxwellova rovnice**

Z této rovnice vidíme, že je magnetické pole vírové (nepotenciální).

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

**II. Maxwellova rovnice**

Druhá Maxwellova rovnice říká, že elektrické pole je nevírové (potenciální).

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

**III. Maxwellova rovnice**

Z třetí Maxwellovy rovnice vidíme, že elektrické pole je zřídlové.

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (2.6)$$

**IV. Maxwellova rovnice**

Magnetické pole je nezřídlové (solenoidární).

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.7)$$

Maxwellovy rovnice bývají doplňovány materiálovými vztahy, které spojují tyto rovnice s veličinami popisující elektromagnetické pole. Materiálové vztahy jsou uvedeny pro izotropní prostředí [2], [3].

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.9)$$

## **3 Elektromagnetická kompatibilita elektrických a biologických systémů**

### **3.1 Elektromagnetická kompatibilita elektrických systémů**

Jak uvádí směrnice Evropské unie 2004/108/ES, jedná se o schopnost elektrických přístrojů, zařízení a systémů pracovat ve svém elektromagnetickém poli a zároveň svým elektromagnetickým polem nenarušovat chod zařízení v jejich okolí.

Pokud chceme určit EMC daného zařízení, postupujeme tak, že prozkoumáme zdroj elektromagnetického rušení, přenosové prostředí (elektromagnetickou vazbu) a rušený objekt (přijímač rušení).

Zdroj elektromagnetického rušení může být přírodní (např. Slunce, některé atmosférické jevy (např. blesky) apod.) nebo vytvořený člověkem. Tyto zdroje zahrnují veškerá elektronická zařízení, elektrické motory, elektrické spotřebiče apod.

Při zkoumání přenosového prostředí se zabýváme možnými způsoby přenosu elektromagnetického rušení do okolí zařízení a dále pak typy přenosových prostředí. Přenosovými prostředí jsou: elektrické kabely, venkovní vedení, optické kabely, signálové vodiče, okolní vzduch apod.

U rušených objektů se zabýváme jejich reakcí na elektromagnetické rušení. Z této reakce poté určíme jejich elektromagnetickou odolnost. Mezi přijímače rušení řadíme například: číslicovou techniku, počítače, televizní a radiové přijímače a mnoho dalších zařízení [7].

### **3.2 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů**

Zabývá se vlivem přírodních a umělých zdrojů elektromagnetických polí na biologické systémy. Jejich maximálními možnými úrovněmi expozice, které neohrozí životy ani zdraví člověka. Účinky elektromagnetického pole na biologické organismy závisí na době expozice, charakteru záření (především na jeho frekvenci) a na vlastnostech organismu. Každý organismus reaguje na elektromagnetické pole svým jedinečným způsobem, proto je téměř nemožné dojít ke správným závěrům při výzkumech, při kterých používáme větší vzorek populace [7], [25], [26].



## 4 Biologické účinky elektromagnetického pole

Elektromagnetické pole má biologické účinky v celém svém frekvenčním spektru. Tyto účinky mohou mít pozitivní i negativní charakter nejen na živé organismy ale i na životní prostředí. Světová zdravotnická organizace (WHO) a mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením (ICNIRP) stanovili limity, které musí být splněny, aby nedošlo k ohrožení zdraví člověka [4].

Biologické účinky EMP je těžké přesně určit. Mnohé z experimentů nemohou být aplikované na lidi, a proto nemůžeme přesně stanovit účinky na lidský organismus.

Biologické účinky závisí na několika parametrech EMP:

- na použitém rozsahu frekvencí
- magnetické indukci
- na délce expozice
- tvaru pole

A na vlastnostech organismu:

- jeho rozměrech
- hmotnosti
- tloušťce pokožky, tukových vrstev a svalstva
- na jeho aktuálním zdravotním a psychickém stavu
- obsahu vody
- na působení zátěžových či stresových faktorů

Účinky elektromagnetického pole na živé organismy jsou dvou typů.

- **tepelné účinky** – převládají u polí o vysokých kmitočtech nad 100 kHz.

- **netepelné účinky** – projevují se u dlouhodobě působících nízkofrekvenčních polí [9], [11], [17], [18].

#### 4.1 Tepelné účinky elektromagnetického pole

Tepelné účinky vznikají působením elektromagnetických polí o vysoké frekvenci. S rostoucí frekvencí rostou tepelné účinky. Čím bude látka vodivější, tím rychleji se bude zahřívat. Pokud se látka rychle zahřívá, dochází k přeměně záření na teplo už ve vnějších vrstvách. U svaloviny je tato hloubka vniku okolo 2,5 cm. V hlubších vrstvách dochází k přenosu tepla vedením.

Množství absorbované energie závisí na obsahu vody v tkáni, na velikosti exponovaného povrchu a na intenzitě pole. Pokud není organismus schopen toto teplo odvést do okolí, dojde ke zvýšení teploty organismu. Toto zvýšení teploty může být v rámci celého organismu nebo jen lokálního charakteru.

Nejcitlivěji na zvýšení teploty reagují oči a mozek. V případě očí dochází vlivem vyšší teploty ke vzniku zákalu nebo popálení oční rohovky.

Při krátkodobé expozici může dojít k popáleninám. Při dlouhodobé expozici dochází ke zvýšení teploty vnitřních orgánů. Toto zvýšení teploty může způsobit jejich poškození a zvýšení teploty krve.

Organismus je schopen toto zvýšení teploty částečně regulovat, pokud ovšem na organismus bude působit pole o takové intenzitě, kterou již organismus nebude schopen regulovat, dojde k jeho přehřátí a následné smrti [6], [9], [11], [17], [18], [19], [20].

#### 4.2 Netepelné účinky elektromagnetického pole

Netepelné účinky se projevují v případě dlouhodobé expozice polí o nízké frekvenci. Tyto účinky vznikají díky elektromagnetické indukci.

Statická magnetická indukce působí v organismu na pohybující se náboje Lorentzovými silami. Tím dojde ke vzniku elektrického pole a elektrických proudů. Ty pak působí na proudící kapaliny uvnitř organismu (např. krev).

Časově proměnná magnetická indukce vybujuje v organismu elektrické napětí a proudy. Tyto proudy jsou závislé na vodivosti a působí na receptory na povrchu buněk. Ovlivnění těchto receptorů vede ke vzniku řetězců chemických reakcí. Účinky se projevují především na centrálním a autonomním nervovém systému, kardiovaskulárním systému, vylučovací a zažívací soustavě.

Dlouhodobé vystavení těmto polím se projevuje pocitem ochablosti, vyčerpanosti,

lhostejnosti, zvýšenou únavou, poruchami spánku, snížením pozornosti a bolestmi hlavy.

V případě elektromagnetických polí se spekuluje o jejich vlivu na zvýšení rizika výskytu rakovinných onemocnění. Souvislost mezi vznikem některých druhů nádorových onemocnění a ozáření nízkofrekvenčním polem o malých intenzitách nebyla plně prokázána [6], [9], [11], [17], [18], [19], [20].

### 4.3 Využití elektromagnetického pole v medicíně

Účinky elektromagnetických polí nemusí být pouze negativního charakteru. Elektromagnetická pole o nízkých intenzitách se používají v medicínských aplikacích. Medicínských aplikací existuje celá řada já zde uvedu jen čtyři z nich.

#### 4.3.1 Magnetická rezonance

Magnetickou rezonanci lze použít pouze u tkání, které obsahují vodu. Atom vody je složen z 2 molekul vody a jedné molekuly vodíku. Při vyšetření magnetickou rezonancí hraje nejdůležitější roli právě tato molekula vodíku.

V jádře vodíku je jediný proton, který rychle rotuje. Kombinací rotace tohoto protonu a jeho náboje vzniká magnetické pole, potažmo magnetický moment. V případě, že proton vodíku umístíme do vnějšího magnetického pole dojde, k tomu, že se jeho magnetické pole bude orientovat rovnoběžně se siločarami vnějšího magnetického pole. Proton vodíku se zároveň otáčí kolem své osy.

Po vložení lidského těla do silného homogenního magnetického pole, jehož intenzita se pohybuje okolo 7 Tesla, se osy rotačního pohybu srovnají rovnoběžně s vnějším magnetickým polem. Některé atomy však srovnají svou osu ve směru vnějšího magnetického pole, jiné proti směru. Magnetická pole atomů s opačným směrem osy se navzájem vyruší. Atomů, které se nevyruší, je jen několik, ale i tento malý počet je dostatečný pro tento druh vyšetření.

Nejdůležitější součástí magnetické rezonance je skener magnetické rezonance. Skener magnetické rezonance má speciální cívky, které slouží k vysílání impulsů radiofrekvenční energie, ale i k příjmu odezvy z lidského těla. Tyto cívky jsou umístěny v blízkosti lidského těla.

Magnetická rezonance funguje tak, že cívky skeneru vyšlou radiofrekvenční vlny

o určité frekvenci. Tyto vlny jsou pohlceny atomy vodíku a donutí je k precesnímu pohybu o určité frekvenci, která je různá od frekvence radiofrekvenční vlny, a v určitém vektoru. V okamžiku zastavení vysílání se atomy vodíku vrací do původní polohy a vyzářují absorbovanou energii. Tehdy dojde k tomu, že tkáň na pár okamžiků „zasvítí“. Světlo je způsobeno velkým množstvím slabých vysokofrekvenčních signálů, které jsou zachyceny cívkami skeneru. Tento proces je periodicky opakován, a to jednou za 30 až 300 milisekund.

Tyto signály jsou poté zpracovány počítačem, který vytvoří černobílý 3 D obraz tkáně a orgánů [16].

### 4.3.2 Elektroencefalografie EEG

Používá se při vyšetřování mozkové aktivity. Výsledkem vyšetření je časový záznam elektrického potenciálu, který vzniká aktivitou neuronů v mozku. Tento záznam je označován jako elektroencefalogram. Elektroencefalograf snímá elektrické napětí způsobené mozkovou aktivitou. Toto napětí je v řádu desítek mikrovoltů. Pro další zpracování musí být tento signál zesílen.

Toto vyšetření se používá u pacientů trpících epilepsií [13].

### 4.3.3 Elektromyografie EMG

Elektromyografie se používá k vyšetření nervů a svalů. Používá se při něm přístroj zvaný elektromyograf. K vyšetření slouží dvě elektrody. Stimulační elektroda, která se připevní na kůži v místě průchodu vyšetřovaného nervu, a snímací elektroda, která se přilepí nebo se vbodne přímo do vyšetřovaného svalu. Pokud se svalem pohne dojde ke změně potenciálu a tato změna je elektromyografem posléze zaznamenána [27].

### 4.3.4 Elektrokardiografie EKG

Elektroencefalografie je vyšetření, při kterém pořizujeme záznam elektrické aktivity srdce. Vyšetření se provádí speciálním přístrojem elektrokardiografem. Tento přístroj snímá elektrické proudy na povrchu těla. Tyto proudy vznikají ve speciálních buňkách uvnitř srdečního svalu. Tyto buňky vedou signály ve všech částech srdce. Tím, že dojde k jejich podráždění, se změní elektrické napětí těchto buněk. To vede ke vzniku elektrických proudů,

které se šíří tělem a lze je změřit i na povrchu [15].

#### 4.4 Biologické účinky nízkofrekvenčních polí

Moje práce se zabývá biologickými účinky polí v okolí nadzemních vedení. Nadzemními vedeními teče střídavý proud s frekvencí 50 Hz. Průchodem střídavého proudu vznikne střídavé elektrické a magnetické pole o stejné frekvenci.

##### 4.4.1 Účinky nízkofrekvenčního střídavého elektrického pole

Intenzita těchto polí je největší v místech největšího průhybu vedení a s rostoucí vzdáleností od vedení klesá. Jako příklad bych uvedla síť vysokého napětí 380 kV. Ve vzdálenosti pět set metrů od vedení byla naměřena intenzita elektrického pole 100 V/m v deseti metrech je až 30 000 V/m. U stožárů vysokého napětí 110 kV naměříme ve sto metrech 200 V/m.

Povrch těla člověka nacházejícího se v tomto poli je nabíjen rytmem tohoto pole a vlivem přítoku a odtoku náboje prochází tělem proud. V domácnostech při intenzitě 1kV/m protéká tělem proud přibližně 15  $\mu\text{A}$  u venkovních vedení vysokého napětí jsou proudy až 100  $\mu\text{A}$ .

Tyto proudy jsou nebezpečné z toho důvodu, že v lidském těle jsou veškeré informace přenášeny elektrickými proudy [1].

##### 4.4.2 Ochrana před střídavým elektrickým polem

Střídavá elektrická pole z venkovního prostředí jsou s velkou účinností odstíněna stěnami obytných budov. Pokud se pohybujeme venku provádí se částečné odstínění terénními úpravami, výsadbou stromů a zeleně. Také je důležité zachovávat minimální vzdálenosti od venkovních vedení [1]:

400 m u 380 kV

250 m u 220 kV

130 m u 110 kV

15 – 20 m u 15 kV

### 4.4.3 Účinky nízkofrekvenčního střídavého magnetického pole

Střídavé magnetické pole opět vzniká při průchodu střídavého proudu a je závislé na frekvenci. Magnetické pole v blízkosti venkovních vedení jsou malá. A to z důvodu velké vzdálenosti vodičů od země. Tato vzdálenost se pohybuje od 10 do 30 metrů. Největší hodnotu magnetické indukce naměříme opět v místě největšího průhybu vodiče. Na 1 kA proudu naměříme magnetickou indukci 10 – 50  $\mu\text{T}$ . Magnetické pole je nebezpečné až od hodnoty 5 000 – 10 000  $\mu\text{T}$  (při frekvenci 20 -30 Hz). Při hodnotě 0,1 T dochází k bolestivým svalovým křečím. Bylo zjištěno, že malé hodnoty magnetického pole nepříznivě ovlivňují produkci hormonů. Byl proveden pokus, při kterém bylo zjištěno, že umělé magnetické pole snižuje produkci spánkového hormonu melatoninu [1].

### 4.4.4 Ochrana před střídavým magnetickým polem

Střídavé magnetické pole nelze odstínit stěnami budov. Je to možné pouze pomocí speciálních kovových slitin např. mu-metalem. Toto řešení je velice nákladné. Ochrana se proto provádí pouze dodržením bezpečných vzdáleností od zdrojů magnetického pole. Intenzita magnetického pole je významně snižována použitím kabelů se dvěma vodiči, kdy jsou žíly vedeny paralelně. V tomto případě dochází k tomu, že se opačná magnetická pole žil vzájemně ruší. Rušivý účinek lze zvýšit tím, že se žíly zkroutí do sebe [1].

## 5 Nadzemní vedení

Nadzemní vedení slouží k přenosu elektrické energie od elektráren, rozvodn, transformoven k rozvodnám nižší soustavy nebo ke konečnému spotřebiteli.

V České republice využíváme těchto napěťových hladin :

- Nízké napětí (nn) : 0,23 kV, 0,4 kV, 0,5 kV
- Vysoké napětí (vn) : 6 kV, 10 kV, 22 kV, 35 kV
- Velmi vysoké napětí (vvn) : 110 kV, 220 kV, 400 kV

Přičemž napěťové hladiny velmi vysokého napětí a zvláště vysokého napětí se používají pro přenosovou soustavou. Přenosová soustava se provozuje zejména na hladinách 220 kV

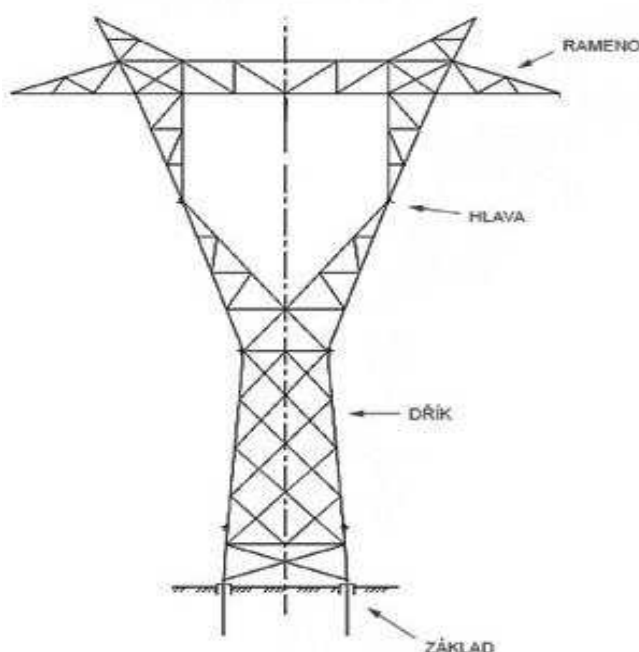
a 400 kV. Můžeme však nalézt i vedení o napětové hladině 110 kV. Provozovatelem přenosové soustavy v České republice je společnost ČEPS, a.s.

Hladiny vysokého a nízkého napětí jsou používány pro distribuční soustavu. Základem je hladina 110 kV. Hladiny vysokého napětí je využívána zejména na 22 kV a někdy i 35 kV. U nízkého napětí je nejvíce používáno 0,4 kV. Hladiny 110 kV a 0,4 kV se provozují s účinně uzemněným uzlem. Naopak hladiny 22 kV a 35 kV se provozují s neúčinně uzemněným uzlem tedy přes zhášecí tlumivku. Provozovateli distribuční sítě jsou společnosti ČES distribuce, a.s., EON distribuce, a.s. a Pražská energetika, a.s. [5], [8], [21]

## 5.1 Stožáry venkovních vedení

Pro různé napětové hladiny jsou používány rozdílné typy stožárů. Pro přenos na hladině 110 a 220 kV se používají stožáry typu soudek a jedle. Na hladině 400 kV stožáry typu portál, delta a kočka.

Konstrukce stožárů musí splňovat základní bezpečnostní požadavky a vydržet namáhání, které vzniká při přenosu elektrické energie. Jsou konstruovány z oceli, betonu a na hladině nn i ze dřeva. Skládají se z několika částí. Z paty, která je pomocí základu spojena se zemí. Na ní navazuje dřík spojující patu s další částí hlavou stožáru. Na hlavě stožáru jsou ramena, na kterých jsou umístěny izolátory vodičů elektrického vedení [10], [21], [23], [22].



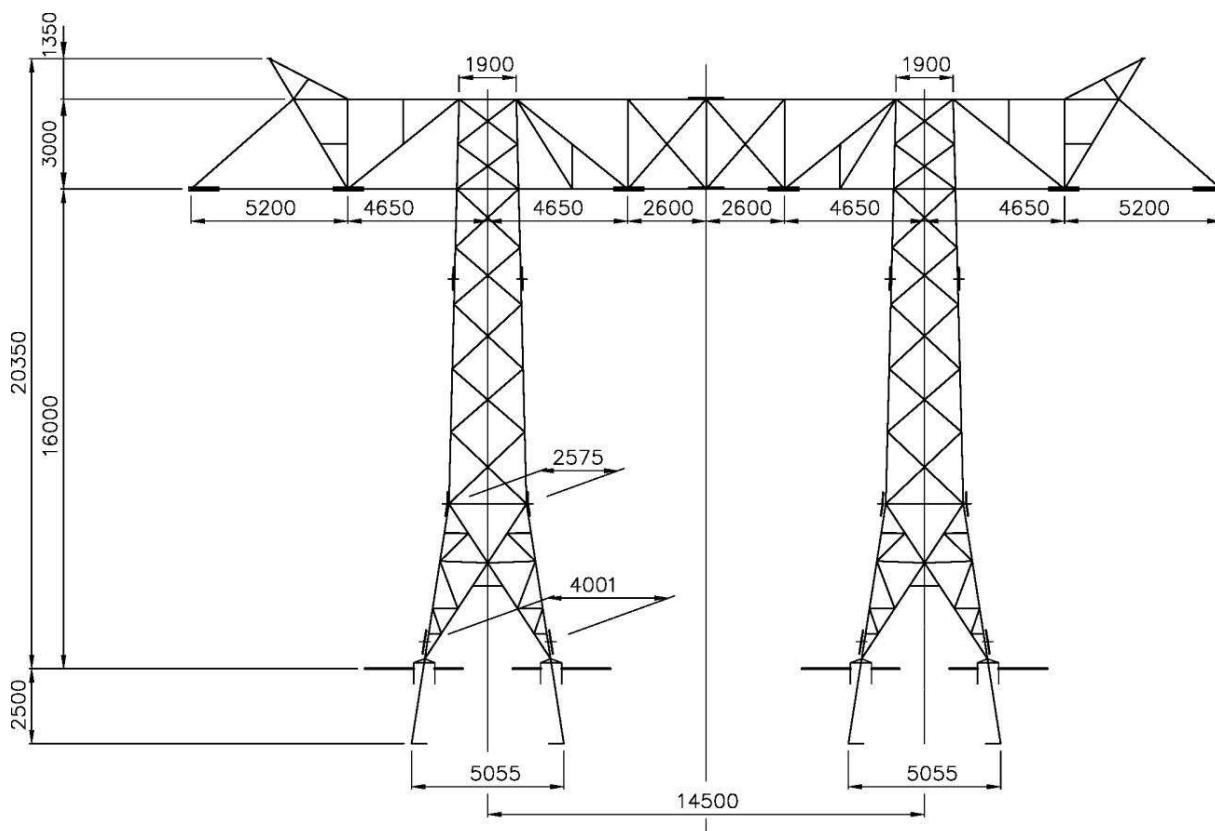
Obr. 5.1 Části konstrukce stožárů – ukázáno na typu stožáru Kočka. Převzato z [8].

Ve své práci jsem se rozhodla modelovat elektrické a magnetické pole u stožárů Dvojitý portál a Soudek.

## 5.2 Typy stožárů

### Dvojitý portál:

Stožár typu Dvojitý portál je složen ze dvou dřívů jejichž ramena jsou spojena. Na vrcholech jsou umístěny dva zemnicí vodiče. Tento typ stožáru je používán na hladině 400 kV. [24]

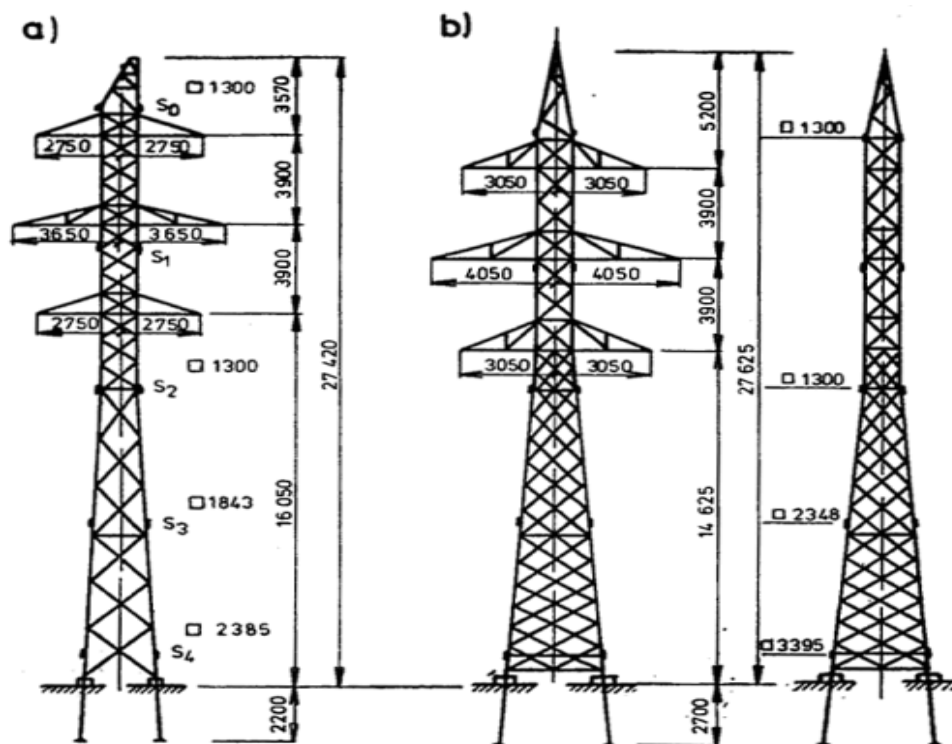


Obr. 5.2 Kotevní stožár typu Dvojitý portál. Převzato z [5].

### Soudek:

Stožáry typu Soudek mají pouze jeden dřív. Na obrázku 4.3 jsou vidět dvě varianty tohoto stožáru. Patří mezi nejvíce používané typy stožárů. Používá se především na hladině 110 kV a 220 kV [24].





Obr. 5.3 Stožár typu Soudek – varianta a) nosný, varianta b) kotevní. Převzato z [24].

## 6 Modelování elektrického a magnetického pole programem Agros2D

### 6.1 Agros2D

Pro modelování elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení použijí multiplatformní aplikaci Agros2D. Tato aplikace lze užít pro řešení těchto fyzikálních polí:

- Elektrostatické pole
- Elektrostatické proudové pole
- Magnetické pole
- Teplotní pole
- Pole elastických deformací
- Akustické pole

Pro řešení parciálních diferenciálních rovnic popisujících zadaný problém využívá metodu konečných prvků.

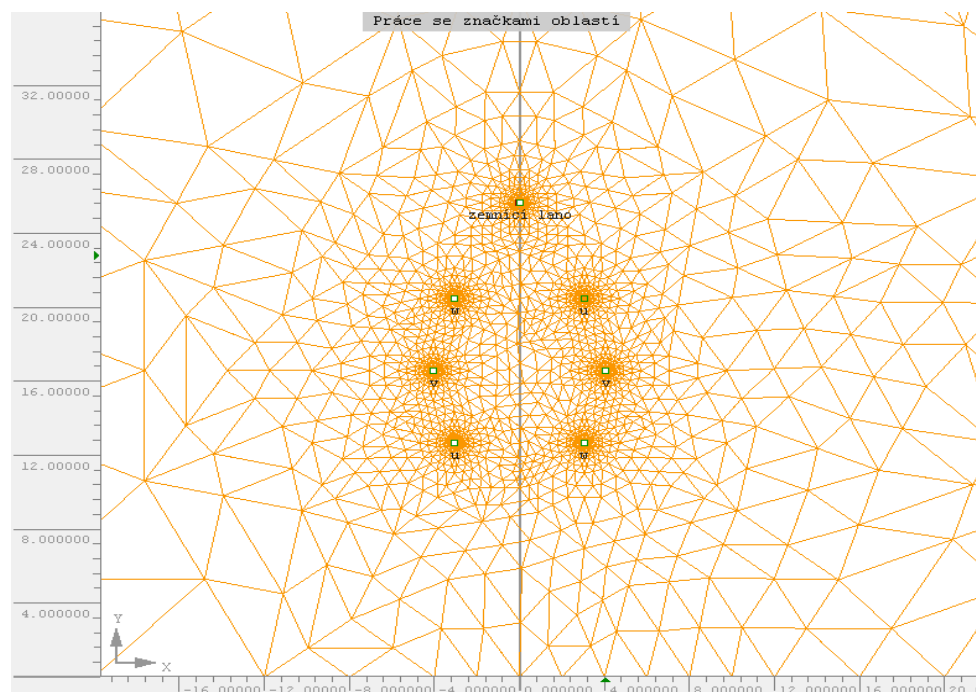
Agros2D řeší zadaný problém ve třech fázích: preprocessing, processing a postprocessing. V preprocessingu dochází k vytvoření geometrického modelu našeho problému. Pomocí uzlů, hran a značek oblastí vytvoříme model. K jednotlivým hranám

následně přiřadíme okrajové podmínky a k značkám oblastí jednotlivé materiály.



Obr. 6.1 Práce se značkami oblastí v programu Agros2D.

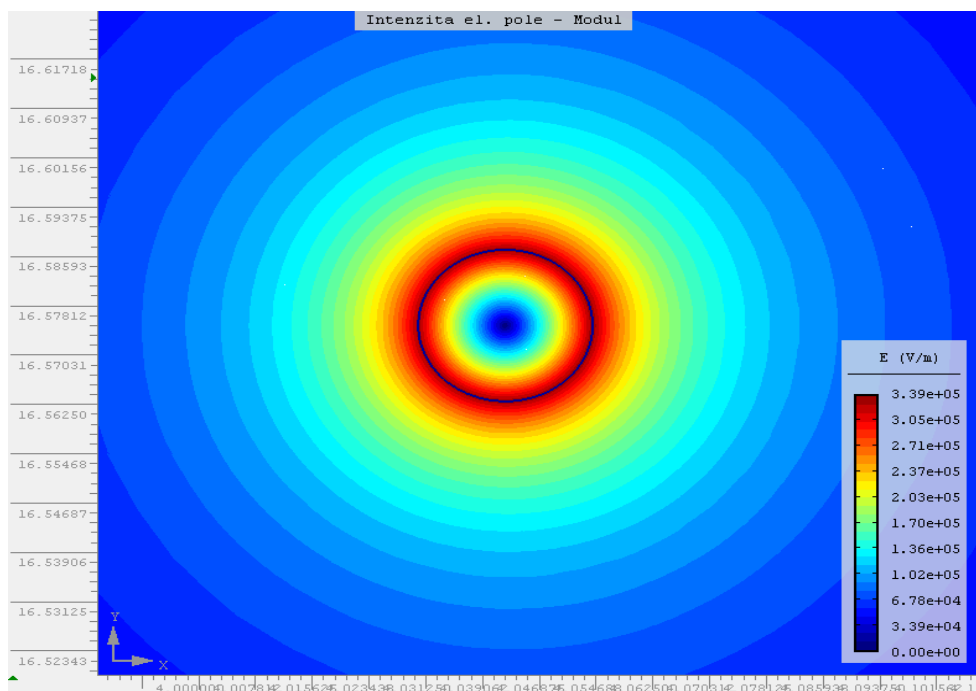
Druhou fází je processing. V této fázi je vytvořená výpočetní síť a jsou řešeny parciální diferenciální rovnice popisující náš problém.



Obr. 6.2 Vytvoření výpočetní sítě v programu Agros2D.

Zpracování výsledků probíhá v postprocessingu. Výsledky mohou být zobrazeny graficky pomocí barevných map, vektorů veličin atd. Veličiny, které vychází ze základních

veličin, je možné vypočítat integrací přes objemy a obsahy [12], [14].



Obr. 6.3 Barevná mapa intenzity elektrického pole v blízkosti vodiče.

## 6.2 Modelování magnetického pole

V případě polí o nízké frekvenci, kde nedochází k rychlým časovým změnám, lze zanedbat posuvný proud v I. Maxwellově rovnici (2.0). Maxwellovy rovnice jsou tedy dány tvary:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (6.0)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6.1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (6.2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (6.3)$$

Při řešení magnetického pole používáme kartézský souřadnicový systém. V námi používaných oblastech předpokládáme lineární prostředí. To znamená, že  $\mu = \text{konst.}$  a  $\gamma = \text{konst.}$  Abychom mohli použít symbolicko-komplexní metodu předpokládáme, že průběh proudu je harmonický. Dále využijeme vztahu (2.9) a vztahu  $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ . Poté můžeme rozložení elektromagnetického pole popsat parciální diferenciální rovnicí:

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot } \underline{\mathbf{A}}) + j\omega \gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{ext} \quad (6.4)$$

V mém případě je vnější proudová hustota nulová. V okolí venkovního vedení mám dvě oblasti. Oblast vzduchu kde platí že relativní permeabilita  $\mu_r$  je rovna 1. V oblasti země je měrná elektrická vodivost  $\gamma$  rovna 0,01. Na hranicích těchto oblastí jsem použila okrajovou podmínku  $\underline{\mathbf{A}}_z = 0$ .

Dále jsem si vypočítala z rovnice (6.5) proud tekoucí vodiči. Pomocí proudu jsem z rovnice (6.6) určila proudovou hustotu  $\mathbf{J}$ .

$$S_{pr} = 3 \cdot U \cdot I \quad (6.5)$$

$$I = \int_S \mathbf{J} dS \quad (6.6)$$

Proudovou hustotu jsem použila při definici materiálu u jednotlivých fází vedení.

Proudová hustota pro stožár 110 kV typu Soudek je  $6,1 \cdot 10^5$  S/m a u 400 kV typu Dvojité portál  $1,02 \cdot 10^6$  S/m.

Řešení jsem prováděla pro různé konfigurace fází vodičů.

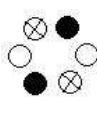
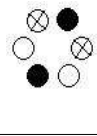
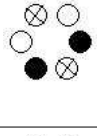
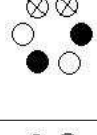
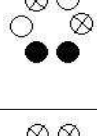

Značení fází v tabulkách:

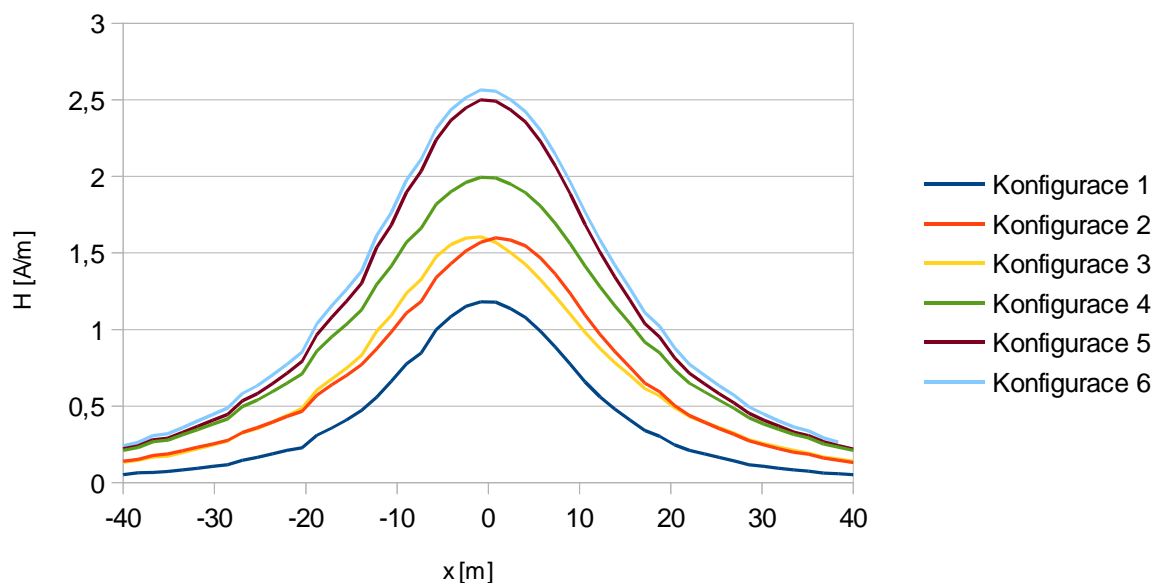
●	fáze u
○	fáze v
⊗	fáze w

## 6.2.1 Magnetické pole u stožárů typu Soudek a Dvojitý portál ve výšce 1,5 metru nad zemí

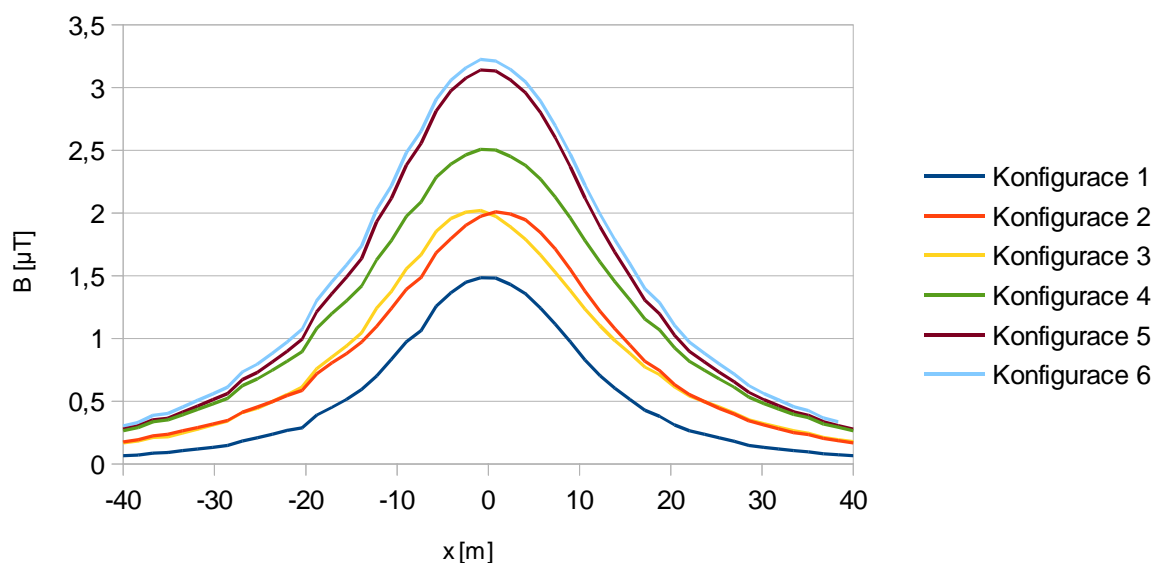
### a) Stožár typu Soudek

Tab. 6.1 Konfigurace fází pro stožár typu Soudek a maximální hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole v 1,5 metru nad zemí.

Konfigurace fází	$B_{\max}$ [ $\mu\text{T}$ ]	$H_{\max}$ [A/m]
1. 	1,48354	1,18057
2. 	2,00934	1,59898
3. 	2,01854	1,60631
4. 	2,50687	1,9949
5. 	3,14126	2,49974
6. 	3,22283	2,5646



Obr. 6.4 Graf průběhu intenzity magnetického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v 1,5 metru nad zemí.



Obr. 6.5 Graf průběhu magnetické indukce pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v 1,5 metru nad zemí.

Z grafu průběhu magnetické indukce je patrné, že největších hodnot dosahuje v ose stožáru. S rostoucí vzdáleností od osy stožáru klesá. Z grafu (Obr. 6.5) můžeme usoudit, že na hodnotu magnetické indukce má vliv také konfigurace fází. V mém případě je největší pro konfiguraci fází číslo šest. Intenzita magnetického pole je také nejvyšší pro konfiguraci číslo 6 (Obr. 6.4).

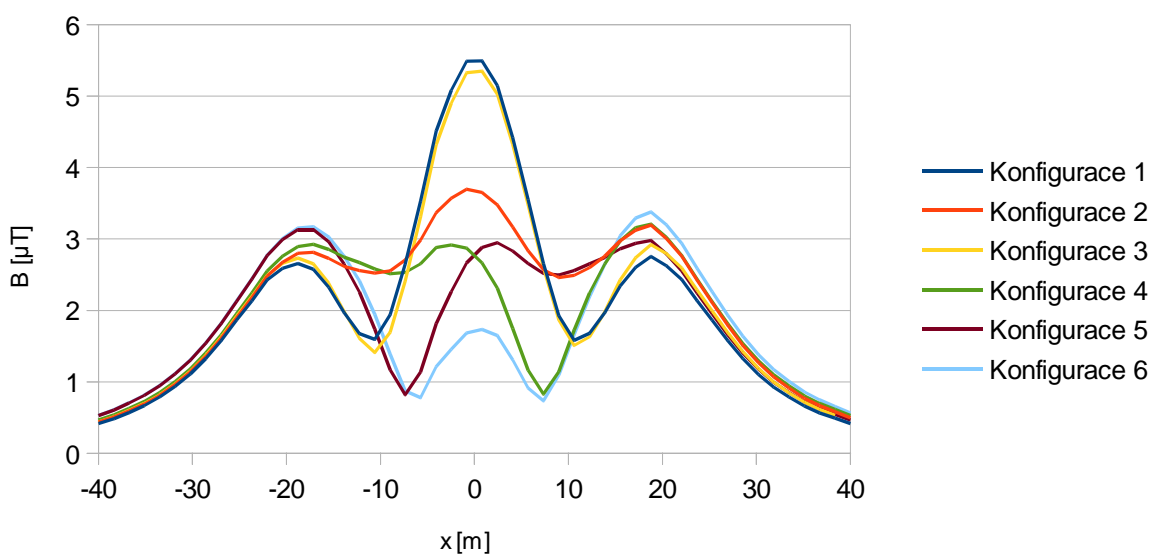
Graf intenzity magnetického pole uvedu pouze pro tento případ. Pro ostatní případy

jsou uvedeny v příloze C.

## b) Stožár typu Dvojitý portál

Tab. 6.2 Konfigurace fází pro stožár typu Dvojitý portál a maximální hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole v 1,5 metru nad zemí.

	Konfigurace fází	$B_{\max}$ [ $\mu\text{T}$ ]	$H_{\max}$ [A/m]
1.	● ○ ⊗ ⊗ ○ ●	8,26079	4,37147
2.	● ○ ⊗ ○ ⊗ ●	6,10399	2,9391
3.	● ○ ⊗ ⊗ ● ○	8,18845	4,25701
4.	● ○ ⊗ ○ ● ⊗	5,96635	2,55393
5.	● ○ ⊗ ● ⊗ ○	5,99299	2,49149
6.	● ○ ⊗ ● ○ ⊗	5,80288	2,6872



Obr. 6.6 Graf průběhu magnetické indukce pro různé konfigurace fází u stožáru typu Dvojitý portál v 1,5 metru nad zemí.

Na rozdíl od stožáru typu Soudek jsou zde maximální hodnoty magnetické indukce vyšší. Ale stále jsou pod maximální povolenou hodnotou danou vyhláškou vlády. Nejvyšších hodnot dosahují konfigurace fází jedna a tři. Optimální uspořádání fází má konfigurace 6. Stejně závěry platí i pro intenzitu magnetického pole (Obr. C2).

### 6.2.2 Magnetické pole u stožárů typu Soudek a Dvojitý portál v minimální výšce dolních vodičů od země

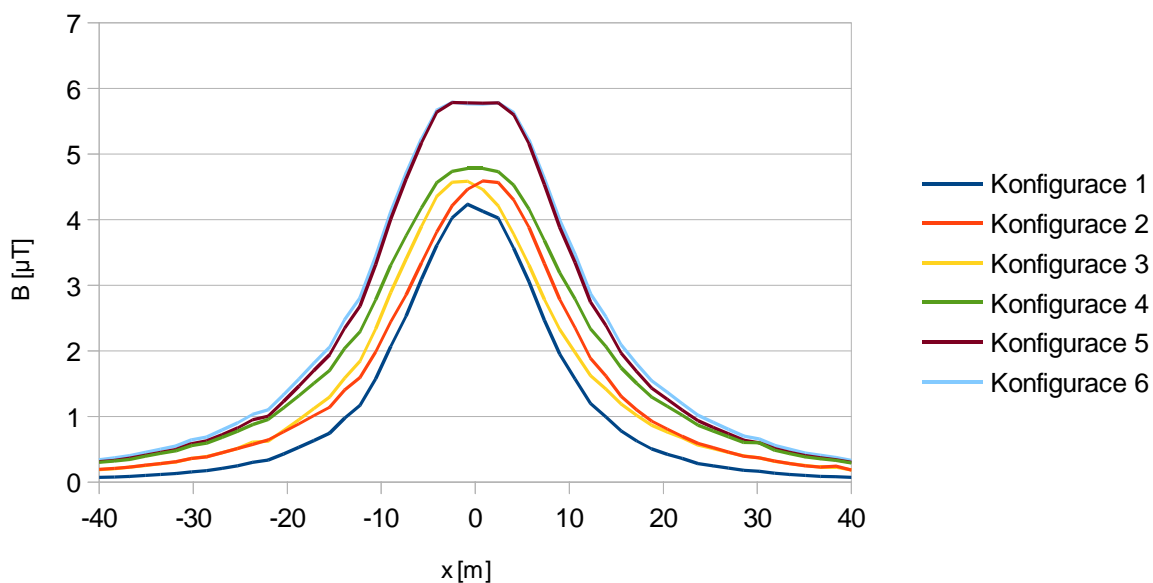
Mezi stožáry nejsou AIFe lana napnutá, ale mají určitý průvės. V místě průvėsu lan je intenzita elektrického a magnetického pole nejvyšší. V normě ČSN EN 61936-1 jsou uvedeny minimální vzdálenosti fází AIFe lan od země. Já jsem při své simulaci použila vzdálenost 6 metrů od země pro stožár typu Soudek. A 8 metrů nad zemí pro stožár typu Dvojitý portál.

#### a) Stožár typu soudek

Tab. 6.3 Konfigurace fází pro stožár typu Soudek a maximální hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole v minimální výšce dolních vodičů od země.

	Konfigurace fází	$B_{\max}$ [ $\mu\text{T}$ ]	$H_{\max}$ [A/m]
1.		4,23635	3,37118
2.		4,5882	3,65117
3.		4,58552	3,6904
4.		4,7819	3,80531
5.		5,78568	4,6041
6.		5,78861	4,6043





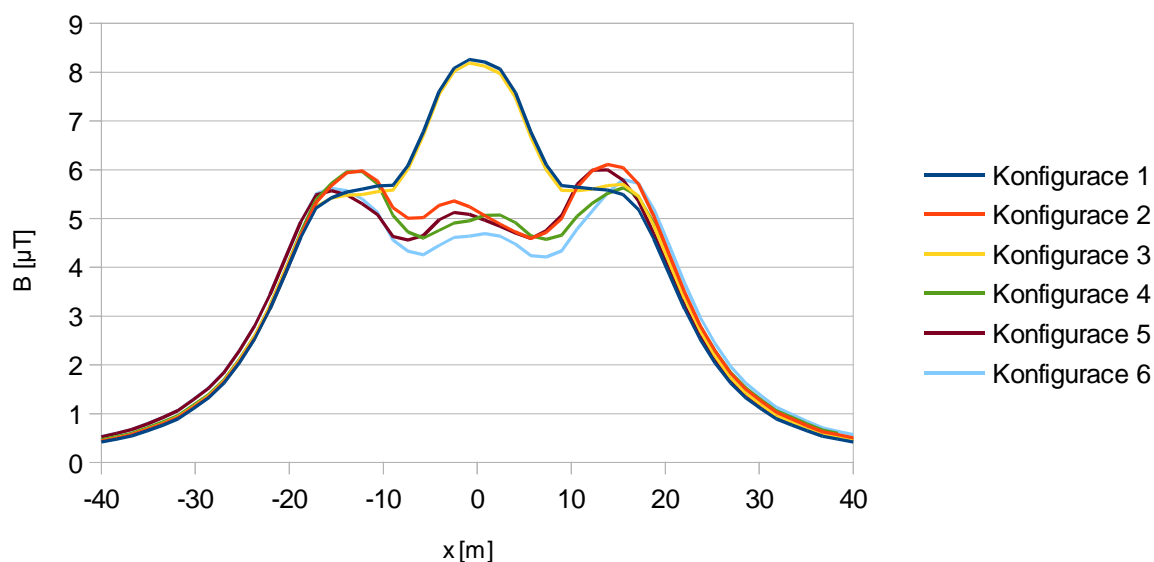
Obr. 6.7 Graf průběhu magnetické indukce pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v minimální výšce dolních vodičů od země.

V místě minimální vzdálenosti vodičů od země je průběh magnetické indukce shodný s průběhem ve výšce 1,5 metru nad zemí. Stále platí, že nejvyšších hodnot dosahuje v ose stožáru. Velikosti indukce jsou větší ale nepřekračují státem stanovenou bezpečnou hodnotu. Nejhorší variantou je uspořádání fází označené jako konfigurace 5, optimální je konfigurace 1 (Obr. 6.7). Pro intenzitu magnetického pole u stožáru typu Soudek platí stejné závěry. Nejvyšších hodnot dosahují konfigurace fází označené jako konfigurace 5 a konfigurace 6. Naopak nejnižších konfigurace 1 (Obr. C1).

## b) Stožár typu dvojitého portálu

Tab. 6.4 Konfigurace fází pro stožár typu dvojitého portálu a maximální hodnoty magnetické indukce v minimální výšce dolních vodičů od země.

	Konfigurace fází	$B_{\max}$ [ $\mu\text{T}$ ]	$H_{\max}$ [A/m]
1.	● ○ ⊗ ⊗ ○ ●	8,26079	6,57373
2.	● ○ ⊗ ○ ⊗ ●	6,10399	4,8574
3.	● ○ ⊗ ⊗ ● ○	8,18845	6,51616
4.	● ○ ⊗ ○ ● ⊗	5,96635	4,74787
5.	● ○ ⊗ ● ⊗ ○	5,99299	4,76907
6.	● ○ ⊗ ● ○ ⊗	5,80288	4,61778



Obr. 6.8 Graf průběhu magnetické indukce pro různé konfigurace fází u stožáru typu Dvojitého portálu v minimální výšce dolních vodičů od země.

V případě stožáru typu Dvojitý portál v minimální výšce fázových vodičů nad zemí dosahuje magnetická indukce vyšších hodnot než tomu bylo ve výšce 1,5 metru nad zemí (Obr. 6.6). Nejhorší z hlediska magnetické indukce jsou konfigurace jedna a tři. Naopak nejlepší je konfigurace číslo šest. V případě intenzity magnetického pole je nejhorší konfigurací fází konfigurace 1. Optimální je konfigurace fází označená konfigurace 6 (Obr. C3).

### 6.3 Modelování elektrického pole

Pro modelování elektrického pole v programu Agros2D si nejprve musím určit náboj a z náboje pak vypočítáme objemovou hustotu náboje, kterou zadáváme do programu.

Pro určení rozložení elektrostatického pole použijeme metodu zrcadlení. V mém případě je vodič o náboji  $Q_j$  obklopen prostředím s permitivitou  $\epsilon$  v určité výšce nad zemí. To znamená, že nemohu určit elektrostatický potenciál přímo, protože rozložení elektrostatického pole je dáno nábojem na vodiči a nábojem vzniklým elektrostatickou indukcí na povrchu země. Povrch země uvažujeme jako dokonale vodivý, to znamená že na rozhraní vzduch - země je nulový potenciál. Vytvoříme obraz náboje na našem vodiči, který bude osově souměrný podle hranice vzduch-země. Obrazu přiřadíme náboj stejné velikosti ale opačné polarity. Potenciál je pak dán součtem potenciálů vzniklých vzájemným působením nábojů na vodiči a jeho obrazu.

Jelikož se v mém případě jedná o systém s více vodiči, určíme výsledný potenciál algebraickým součtem jednotlivých dvojic potenciálů.

Náboj na jednotlivých vodičích můžeme určit pouze v případě, že známe umístění vodičů v prostoru a jejich napětí. Užíváme metodu parciálních kapacit. Vypočteme matici potenciálových koeficientů  $\underline{\mathbf{A}}$ . Stanovíme také matici kapacitních koeficientů  $\underline{\mathbf{B}}$ , která je inverzní maticí k matici  $\underline{\mathbf{A}}$ .

$$\underline{\mathbf{A}} = \{\alpha_{ij}\} \quad (6.7)$$

Fázové vodiče si označíme čísly  $i, j = 1, 2, \dots, 8$ . Přičemž indexy 1, 2, 3 jsou pro fázové vodiče 1. obvodu a indexy 5, 6, 7 pro fázové vodiče 2. obvodu. Indexem 4 označíme zemnicí lano 1. obvodu a 8 zemnicí lano 2. obvodu.

$$\alpha_{ii} = k \ln \frac{2y_i}{R_i} \quad (6.8)$$

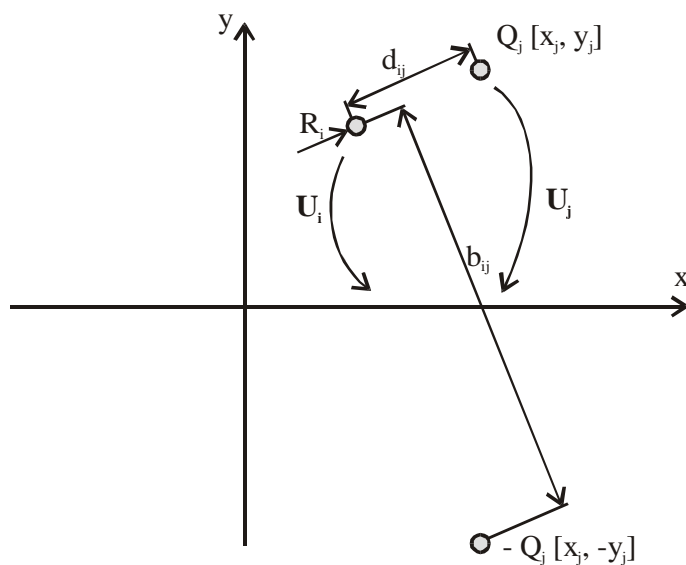
$$\alpha_{ij} = k \ln \frac{b_{ij}}{d_{ij}} \quad (6.9)$$

$$k = \frac{1}{2\pi \epsilon_0 l} = 1,8 \cdot 10^{10} \quad (6.10)$$

$$b_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2} \quad (6.11)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (6.12)$$

Vzdálenosti  $b_{ij}$  (rovnice 6.11) a  $d_{ij}$  (rovnice 6.12) jsou vidět na obr. 6.9.



Obr. 6.9 Rozložení potenciálových koeficientů.

Pomocí rovnic (6.8), (6.9), (6.10), (6.11) a (6.12) si stanovíme jednotlivé prvky matice  $\mathbf{A}$  pro oba typy stožárů. Z matice  $\mathbf{A}$  si pomocí výrazu (6.13) určíme matici  $\mathbf{B}$ .

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1} = \{\beta_{ij}\} \quad (6.13)$$

Pokud máme matici kapacitních koeficientů, můžeme s její pomocí spočítat podle vztahu (6.14) náboj na fázových vodičích.  $\underline{U}$  je matice napětí na fázových vodičích a zemních lanech.

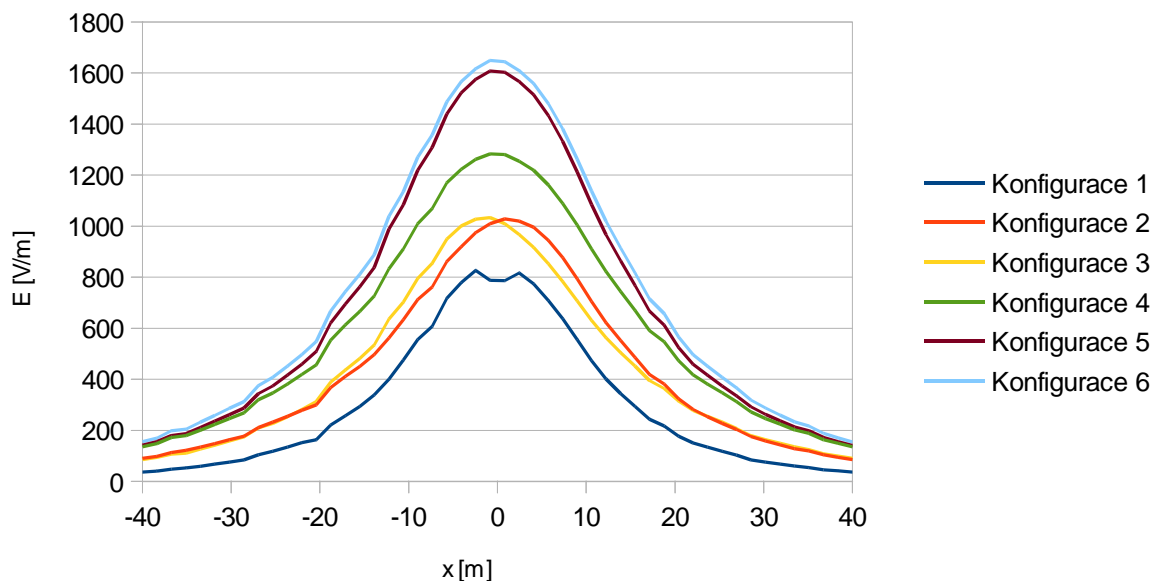
$$\underline{Q} = \underline{B} \cdot \underline{U} \quad (6.14)$$

### 6.3.1 Elektrické pole u stožárů typu Soudek a Dvojitý portál ve výšce 1,5 metru nad zemí

#### a) Stožár typu soudek

Tab. 6.5 Konfigurace fází pro stožár typu Soudek a maximální hodnoty intenzity elektrického pole v 1,5 metru nad zemí.

	Konfigurace fází	$E_{\max}$ [V/m]
1.		826,652
2.		1028,78
3.		1033,49
4.		1283,52
5.		1608,33
6.		1650,09



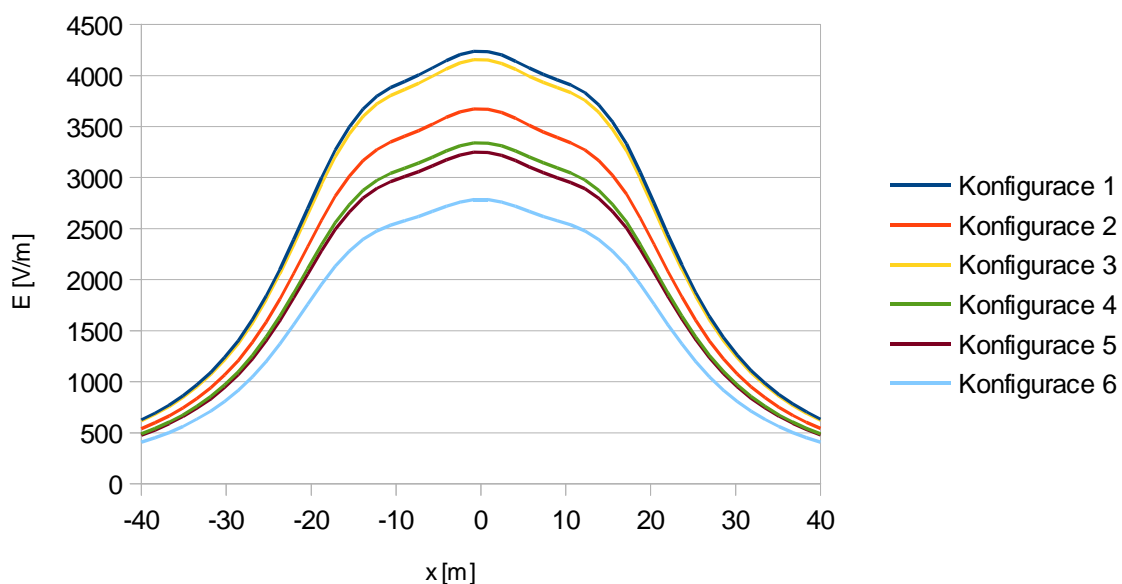
Obr. 6.10 Graf průběhu intenzity elektrického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v 1,5 metru nad zemí.

Intenzita elektrického pole je nejvyšší v ose stožáru. Její hodnoty nepřekračují povolenou hodnotu 5000 V/m. Nejpriznivější je konfigurace fází označená jako konfigurace 1. Naopak nejvyšších hodnot intenzita elektrického pole dosahuje pro konfiguraci fází označenou konfigurace 6.

## b) Stožár typu dvojitý portál

Tab. 6.6 Konfigurace fází pro stožár typu Dvojitý portál a maximální hodnoty intenzity elektrického pole v 1,5 metru nad zemí.

	Konfigurace fází	$E_{\max}$ [V/m]
1.	● ○ ⊗ ⊗ ○ ●	4237,26
2.	● ○ ⊗ ○ ⊗ ●	3671,70
3.	● ○ ⊗ ⊗ ● ○	4153,37
4.	● ○ ⊗ ○ ● ⊗	3338,52
5.	● ○ ⊗ ● ⊗ ○	3247,56
6.	● ○ ⊗ ● ○ ⊗	2783,94









Obr. 6.11 Graf průběhu intenzity elektrického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Dvojitý portál v 1,5 metru nad zemí.

Intenzita elektrického pole v 1,5 metru nad zemí u stožáru typu Dvojitý portál dosahuje vysokých hodnot, které se blíží k maximální dovolené hodnotě. Nejhorší konfigurací fází je konfigurace 1.

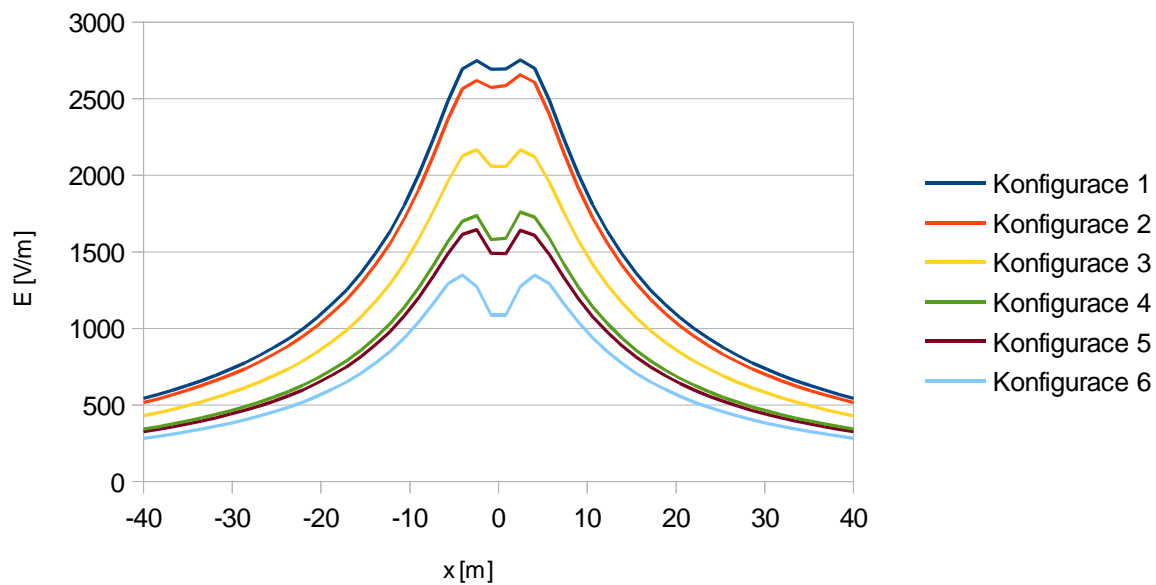
### 6.3.2 Elektrické pole u stožárů typu Soudek a Dvojitý portál v minimální výšce dolních vodičů od země

#### a) Stožár typu soudek

Tab. 6.7 Konfigurace fází pro stožár typu Soudek a maximální hodnoty intenzity elektrického pole v minimální výšce dolních vodičů od země.

Konfigurace fází	$E_{\max}$ [V/m]
1. 	2749,03
2. 	2656,54
3. 	2165,84
4. 	1760,89
5. 	1645,91
6. 	1348,83





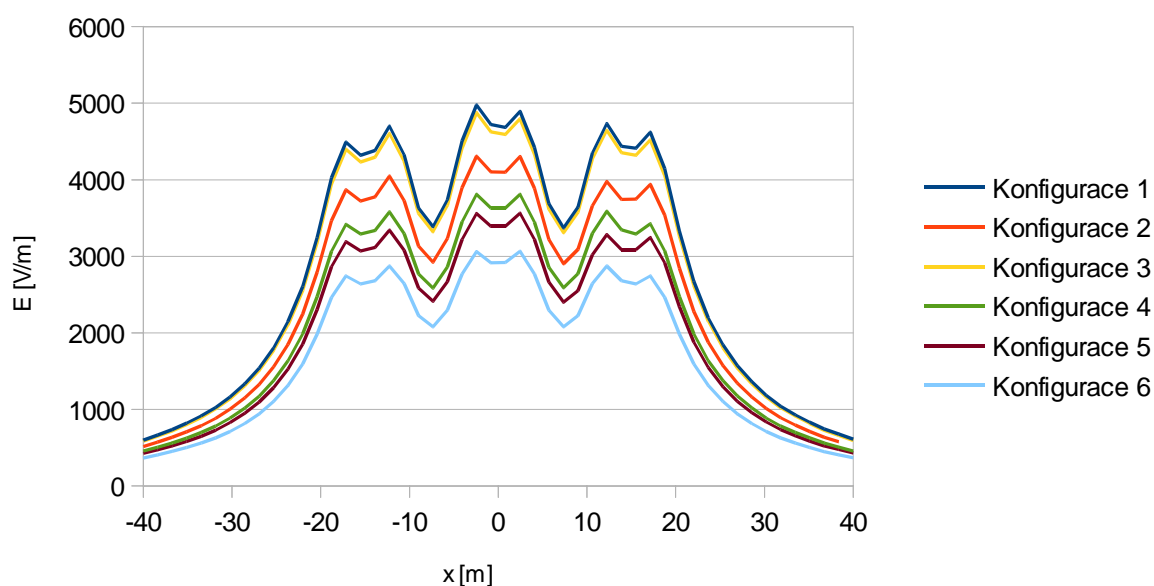
Obr. 6.12 Graf průběhu intenzity elektrického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v minimální výšce vodičů od země.

Nejvyšší hodnota intenzity elektrického pole je stále v normě. Nejhorší konfigurace fází je opět konfigurace 1, která byla pro tento typ stožáru nejhorší i v 1,5 metru nad zemí (Obr. 6.10).

## b) Stožár typu dvojitého portálu

Tab. 6.8 Konfigurace fází pro stožár typu Dvojitého portálu a maximální hodnoty intenzity elektrického pole v minimální výšce dolních vodičů od země.

	Konfigurace fází	$E_{\max}$ [V/m]
1.	● ○ ⊗ ⊗ ○ ●	4894,27
2.	● ○ ⊗ ○ ⊗ ●	4305,36
3.	● ○ ⊗ ⊗ ● ○	4797,08
4.	● ○ ⊗ ○ ● ⊗	3812,33
5.	● ○ ⊗ ● ⊗ ○	3561,89
6.	● ○ ⊗ ● ○ ⊗	3065,16



Obr. 6.13 Graf průběhu intenzity elektrického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Dvojitého portálu v minimální výšce vodičů od země.

Při konfiguraci fází označenou jako konfigurace 1 je jejich maximální hodnota intenzity elektrického pole téměř rovna maximální dovolené hodnotě.

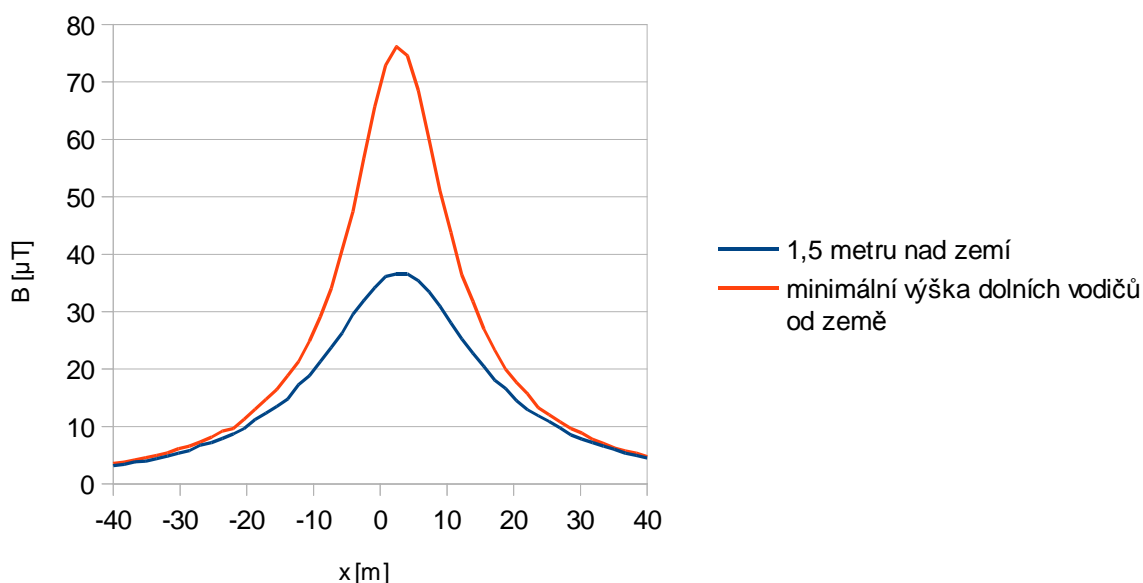
#### 6.4 Zkrat na vedení

Zkrat na vedení vzniká z několika důvodů. U venkovních vedení jsou hlavními příčinami údery blesků nebo mechanické poškození vedení, které bývá nejčastěji způsobeno pádem větví stromů na AlFe lana. Nejčastějším druhem zkratu je jednofázový zkrat.

Při vzniku zkratu dochází k nárůstu proudu tekoucího vodičem. Jejich průtokem může dojít k poškození vedení. Z tohoto důvodu jsou vedení chráněna zemnicími lany, bleskojistkami, odstraňováním porostu v blízkosti linek.

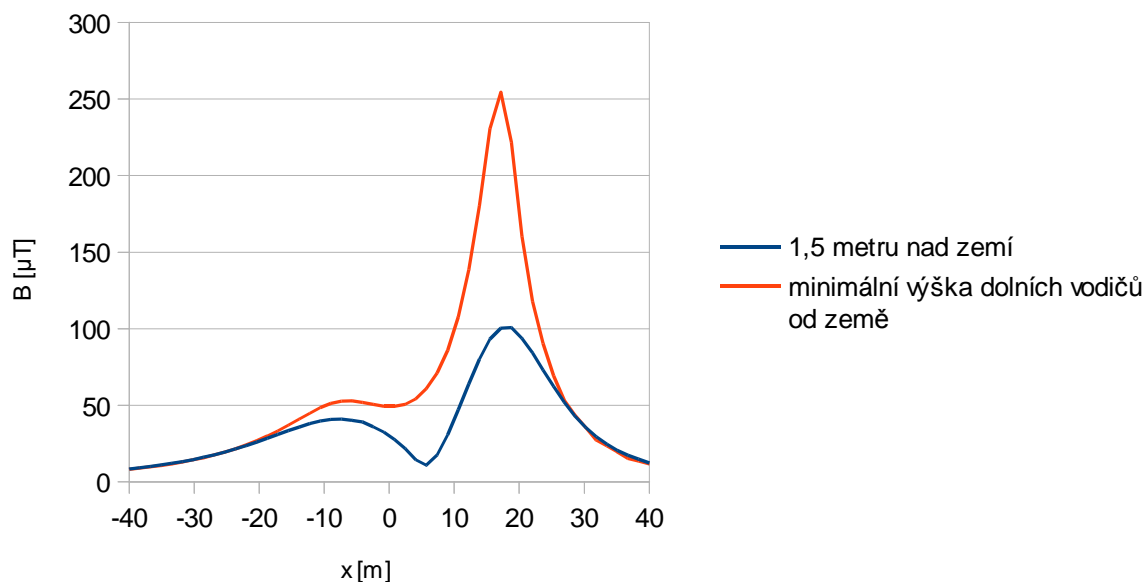
Při simulaci magnetického pole při jednofázovém zkratu jsem použila u stožáru typu Soudek pro zkratový proud hodnotu 10 kA. U stožáru Dvojitý portál pak hodnoty 30 kA. Z hodnot zkratových proudů jsem opět podle vztahu (6.6) určila proudovou hustotu. V případě stožáru Soudek činila 23 MS/m a u Dvojitého portálu 67 MS/m.

Výsledné grafy jsem uvedla pouze pro lano, ve kterém byla nejvyšší hodnota magnetické indukce. U stožáru typu Soudek to bylo lano nejbližší k zemi. U Dvojitého portálu lano nejdále od osy stožáru.



Obr. 6.14 Graf průběhu intenzity magnetické indukce při zkratu u stožáru Soudek.

Hodnoty magnetické indukce u stožáru Soudek při jednofázovém zkratu jsou desetkrát vyšší než tomu bylo v bezporuchovém stavu. Stále však nedojde k překročení hodnoty  $100 \mu\text{T}$ , která je uvedena ve vyhlášce.



Obr. 6.15 Graf průběhu intenzity magnetické indukce při zkratu u stožáru Dvojitý portál.

Při simulaci zkratu na stožáru Dvojitý portál jsem použila vyšší hodnoty zkratového proudu. V tomto případě došlo k překročení hodnoty dané vyhláškou. Maximální hodnota magnetické indukce v 1,5 metru je  $100,838 \mu\text{T}$ . V minimální vzdálenosti fázových lan od země pak  $254,336 \mu\text{T}$ .

Tyto poruchové stavy jsou jen krátkodobé proto by ani tyto zvýšené hodnoty magnetické indukce neměly mít negativní účinek na lidský organismus.

## 7 Závěr

Ve své práci jsem se zabývala účinky elektromagnetického pole venkovních vedení na živé organismy. Provedla jsem simulaci magnetického a elektrického pole v programu Agros2D pro dva typy stožárů. Stožár typu dvojitý portál pro napěťovou hladinu 400 kV a stožár soudek pro napěťovou hladinu 110 kV.

Simulační programy jsou efektivními nástroji pro řešení elektrických a magnetických polí. V programu Agros2D lze elektrické pole modelovat pouze v ustáleném stavu, tedy jen v jednom časovém okamžiku. Avšak proudy tekoucí venkovním vedením mají harmonický průběh. Výsledky v práci jsou uvedeny pouze pro časový okamžik  $t = 0$  s, což může výsledky částečně zkreslit, i přes to můžeme z výsledných hodnot usuzovat, zdali byly překročeny povolené hodnoty. V případě výpočtu magnetických polí může dojít k chybě nevhodným zvolením hranice vyšetřované oblasti. Hranice oblasti by se měla volit v takové vzdálenosti, v níž má y složka magnetické indukce zanedbatelnou velikost. V opačném případě je nutné oblast zvětšit.

Výsledné hodnoty intenzity elektrického pole a magnetické indukce jsem nejprve odečetla ve výšce 1,5 metru nad zemí, která odpovídá výšce, v níž se pohybuje průměrný člověk. Další odečty jsem prováděla u stožáru dvojitý portál ve výšce 8 metrů nad zemí a u stožáru soudek v 6 metrech nad zemí. Tyto výšky odpovídají minimální výšce fázových lan nad zemí u těchto napěťových hladin venkovních vedení. V těchto výškách jsou hodnoty magnetické indukce i intenzity elektrického pole nejvyšší.

V nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením je pro lidi, kteří nepracují v prostředí, kde by byli vystaveni působení elektromagnetických polí, stanovena maximální hodnota magnetické indukce 100  $\mu\text{T}$  a maximální hodnota intenzity elektrického pole 5000 V/m.

Ve výšce 1,5 metru nad zemí vyhovují mnou stanovené hodnoty magnetické indukce i intenzity elektrického pole u obou typů stožárů těmto hygienickým limitům. To samé platí i pro minimální výšky fázových lan, tedy u Soudku 6 m nad zemí a u Dvojitého stožáru 8 m nad zemí.

K překročení maximální hodnoty magnetické indukce dojde v případě vzniku jednofázového zkratu. V mém případě došlo k překročení u stožáru Dvojitý portál při zkratovém proudu 30 kA. Ve výšce 1,5 metru nad zemí činila hodnota magnetické indukce 100,838  $\mu\text{T}$ . V místě maximálního průvěsu lana pak 254,336  $\mu\text{T}$ . Tedy téměř dvojnásobek

maximální povolené hodnoty. Při poruchových stavech většinou dochází k rychlému odpojení vedení. Také lidský organismus se pod vedením nevyskytuje ve většině případů delší dobu. Krátkodobé působení elektrického a magnetického pole od venkovních vedení nezpůsobí poškození lidského organismu.

Stejný algoritmus výpočtů, který byl v této práci aplikován pro stožáry Soudek a Dvojitého portál, lze použít i pro jiné typy stožárů. Další výsledky jsou uvedeny v příloze C.

**Použitá literatura:**

- [1] KÖNIG, Holger a ERLACHER, Peter. *Neviditelná hrozba?: elektromagnetická pole kolem nás*. 1. čes. vyd. Ostrava: HEL, 2001. 120 s. ISBN 80-86167-15-1.
- [2] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. 357 s. ISBN 80-7082-826-9.
- [3] MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole – základy teorie*. Praha: BEN, 1998. 159 s.
- [4] FOJT, Lukáš. *Působení elektromagnetických polí na biologické systémy*. Brno, 2007. Disertační práce. Masarykova univerzita. Fakulta přírodovědecká.
- [5] NAZARČÍK, Tomáš. *Vyšetření elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Prof. Ing. Zdeňka BENEŠOVÁ, CSc.
- [6] Ing. GARLÍK, Bohumír, CSc. Prostředí budov a vliv elektrických a elektromagnetických polí na zdraví. *Časopis Stavebnictví* [online]. 11-12/2010 [cit. 26.4.2013]. ISSN 1802 – 2030. Dostupné z: [http://www.casopisstavebnictvicz/prostredi-budov-a-vliv-elektrickyh-a-elektromagnetickyh-poli-na-zdravi\\_N3901](http://www.casopisstavebnictvicz/prostredi-budov-a-vliv-elektrickyh-a-elektromagnetickyh-poli-na-zdravi_N3901)
- [7] Prof. Ing. SVAČINA, Jiří, CSc. Základy elektromagnetické kompatibility Část 1 – Základní pojmy a členění oboru EMC. *Elektrorevue*. [online]. 2000 [cit. 12.4.2013]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00025/index.html>
- [8] Ing. VÍTEK, Aleš. Stožáry v energetice. *T+T Technika a trh* [online]. 2011 [cit. 5.5.2013]. ISSN 1802-6176. Dostupné z: [www.technikaatrh.cz/elektrotechnika/stozary-v-energetice](http://www.technikaatrh.cz/elektrotechnika/stozary-v-energetice)
- [9] IVÁNEK, Lubomír. *Elektromagnetismus – učební text* [online]. První vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007 [cit. 28.4.2013]. Dostupné z: [www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/EMag/Elektromagnetismus.pdf](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/EMag/Elektromagnetismus.pdf)
- [10] Ing. KOSTKA, Tomáš. Mechanika venkovních vedení. In: *outech-havirov.cz* [online]. [cit. 29.4.2013]. Dostupné z: [www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/eti/mech\\_v\\_v.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/eti/mech_v_v.pdf)
- [11] CABANOVÁ, Zuzana. Biologické účinky elektromagnetického pole. In: *dspace.vsb.cz* [online]. 2004 [cit. 1.3.2013]. Dostupné z: [dspace.vsb.cz/handle/10084/83673](http://dspace.vsb.cz/handle/10084/83673)
- [12] KARBAN, Pavel. Agros2D. In: *abclinuxu.cz* [online]. 3.4.2010 [cit. 5.5.2013].

- Dostupné z: [www.abclinuxu.cz/software/veda/agros2d](http://www.abclinuxu.cz/software/veda/agros2d)
- [13] Mudr. KASPEROVÁ, Martina. Elektroencefalografie – EEG. In: *ordinace.cz* [online]. 4.3.2008 [cit. 26.4.2013].  
Dostupné z: [www.ordinace.cz/clanek/elektroencefalografie-eeeg/](http://www.ordinace.cz/clanek/elektroencefalografie-eeeg/)
- [14] MACH, František. Agros2D – řešení přestupu tepla ve zdivu. In: *abclinuxu.cz* [online]. 26.4.2010 [cit. 5.5.2013]. Dostupné z: [www.abclinuxu.cz/software/veda/agros2d-reseni-prestupu-tepla-ve-zdivu](http://www.abclinuxu.cz/software/veda/agros2d-reseni-prestupu-tepla-ve-zdivu)
- [15] MeDitorial. EKG. In: *kardio-motol.cz* [online]. 2013 [cit. 26.4.2013].  
Dostupné z: [www.kardio-motol.cz/ekg](http://www.kardio-motol.cz/ekg)
- [16] Mudr. MLČOCH, Zbyněk. Magnetická rezonance – průběh vyšetření, princip, indikace. In: *zbynekmlcoch.cz* [online]. 14.6.2008 [cit. 26.4.2013].  
Dostupné z: [www.zbynekmlcoch.cz/informace/medicina/nemoci-lecba/magneticka-rezonance-prubeh-vysetreni-princip-indikace](http://www.zbynekmlcoch.cz/informace/medicina/nemoci-lecba/magneticka-rezonance-prubeh-vysetreni-princip-indikace)
- [17] Ing. NOVÁK, Jaroslav. Elektromagnetické pole a zdravotní rizika (I). In: *tzb-info.cz* [online]. 28.1.2004 [cit. 20.4.2013]. Dostupné z: [www.tzb-info.cz/1801-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-i](http://www.tzb-info.cz/1801-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-i)
- [18] Ing. NOVÁK, Jaroslav. Elektromagnetické pole a zdravotní rizika (II). In: *tzb-info.cz* [online]. 4.2.2004 [cit. 20.4.2013]. Dostupné z: [www.tzb-info.cz/1809-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-ii](http://www.tzb-info.cz/1809-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-ii)
- [19] Ing. NOVÁK, Jaroslav. Elektromagnetické pole a zdravotní rizika (III). In: *tzb-info.cz* [online]. 7.7.2005 [cit. 20.4.2013]. Dostupné z: [www.tzb-info.cz/2590-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-iii](http://www.tzb-info.cz/2590-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-iii)
- [20] Ing. NOVÁK, Jaroslav. Elektromagnetické pole a zdravotní rizika (IV). In: *tzb-info.cz* [online]. 7.12.2007 [cit. 20.4.2013]. Dostupné z: [www.tzb-info.cz/4530-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-iv](http://www.tzb-info.cz/4530-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-iv)
- [21] Ing. PROCHÁZKA, Radek. Venkovní vedení VVN (I). Úvod do problematiky přenosové soustavy. In: *tzb-info.cz* [online]. 21.5.2007 [cit. 3.5.2013].  
Dostupné z: [www.tzb-info.cz/4142-venkovni-vedeni-vvn-i](http://www.tzb-info.cz/4142-venkovni-vedeni-vvn-i)
- [22] Ing. PROCHÁZKA, Radek. Stožáry VVN (I). Funkční požadavky na stožáry. In: *tzb-info.cz* [online]. 4.6.2007 [cit. 3.5.2013]. Dostupné z: [www.tzb-info.cz/4170-stozary-vvn-i](http://www.tzb-info.cz/4170-stozary-vvn-i)
- [23] Ing. PROCHÁZKA, Radek. Stožáry VVN (II). Stožáry dálkového vedení. In: *tzb-info.cz* [online]. 11.6.2007 [cit. 3.5.2013]. Dostupné z: [www.tzb-info.cz/4183-stozary-](http://www.tzb-info.cz/4183-stozary-)



vvn-ii

- [24] Ing. PROCHÁZKA, Radek. Stožáry VVN (III). Konstrukční řešení stožárů. In: *tzb-info.cz* [online]. 18.6.2007 [cit. 3.5.2013]. Dostupné z: [www.tzb-info.cz/4192-stozary-vvn-iii](http://www.tzb-info.cz/4192-stozary-vvn-iii)
- [25] Doc. Ing SVOBODA, Jaroslav, CSc. EMC biologických systémů. In: *comtel.cz* [online]. 2010 [cit. 12.4.2013]. Dostupné z: [www.comtel.cz/files/download.php?id=5383](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=5383)
- [26] Ing. STEINMETZ, Martin. EMC biologických systémů. In: *comtel.cz* [online]. 16.5.2005 [cit. 12.4.2013]. Dostupné z: [www.comtel.cz/files/download.php?id=1771](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=1771)
- [27] Mudr. ŠTEFÁNEK, Jiří. Elektromyografie – EMG. In: *stefajir.cz* [online]. 2011 [cit. 26.4.2013]. Dostupné z: [www.stefajir.cz/?q=elektromyografie-emg](http://www.stefajir.cz/?q=elektromyografie-emg)

## Příloha A

### Stožáry pro vedení vn a vvn v ČR



Obr. A.1 Stožár typu kočka.



Obr. A.2 Stožár typu portál.



Obr A.3 Stožár typu soudek nosný (obrázek vlevo), kotevní (obrázek vpravo) pro 220 kV.



Obr. A.4 Stožár typu delta.

## Příloha B

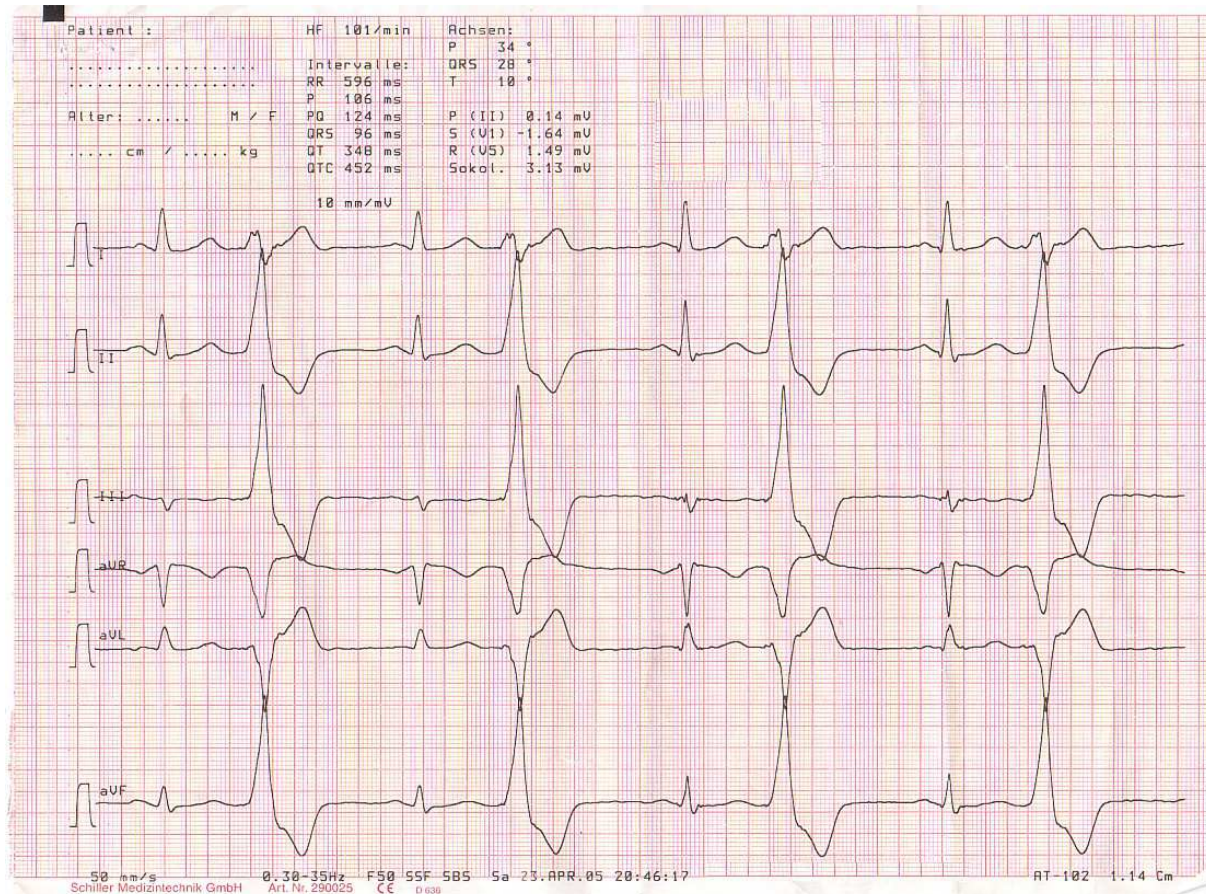
### Využití EMP ve zdravotnictví



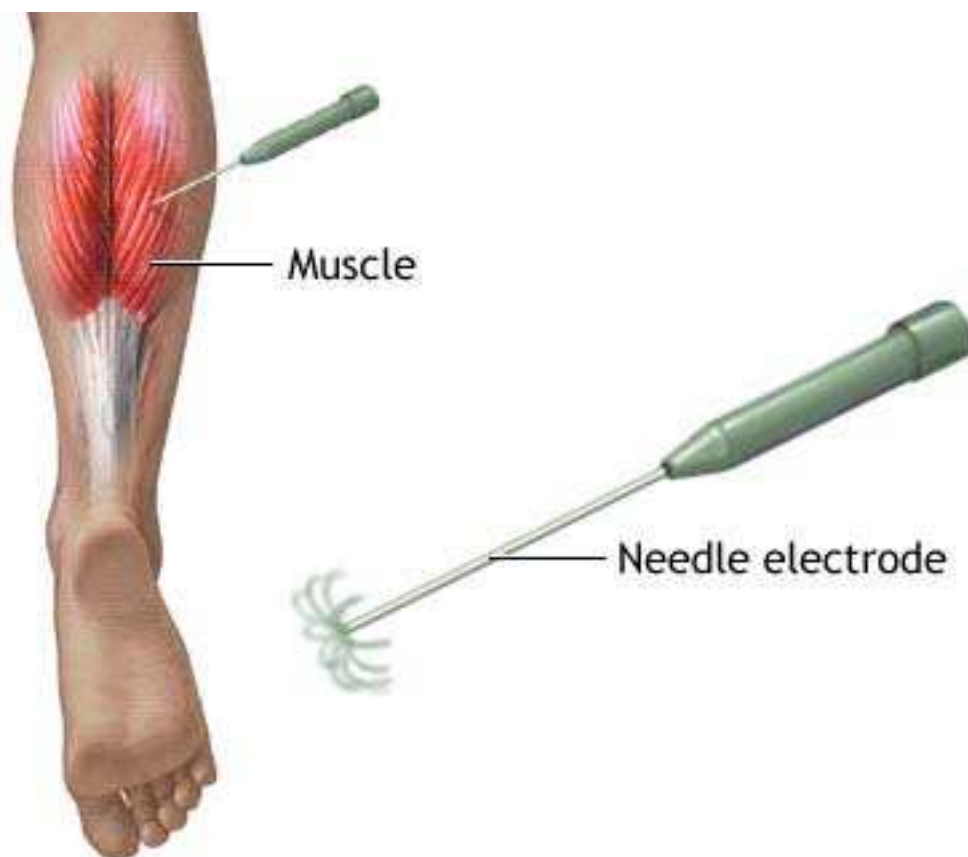
Obr. B.1 Magnetická rezonance.



Obr. B.2 Obraz oblasti hlavy pořízený magnetickou rezonancí



Obr. B.3 Záznam srdeční činnosti z vyšetření EKG.



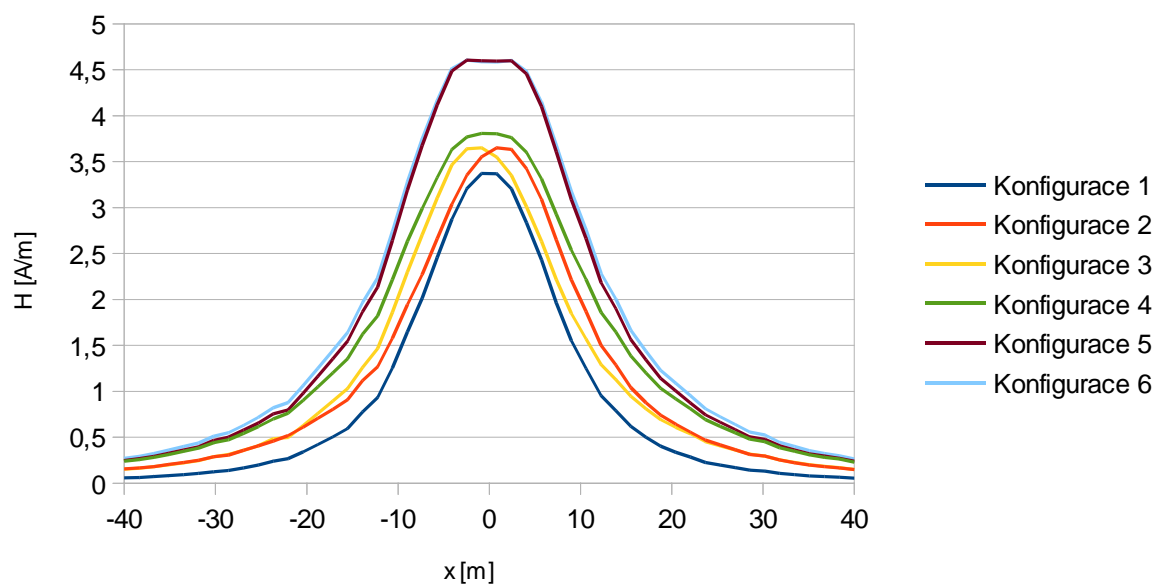
Obr. B.4 Elektroda používaná při EMG vyšetření.



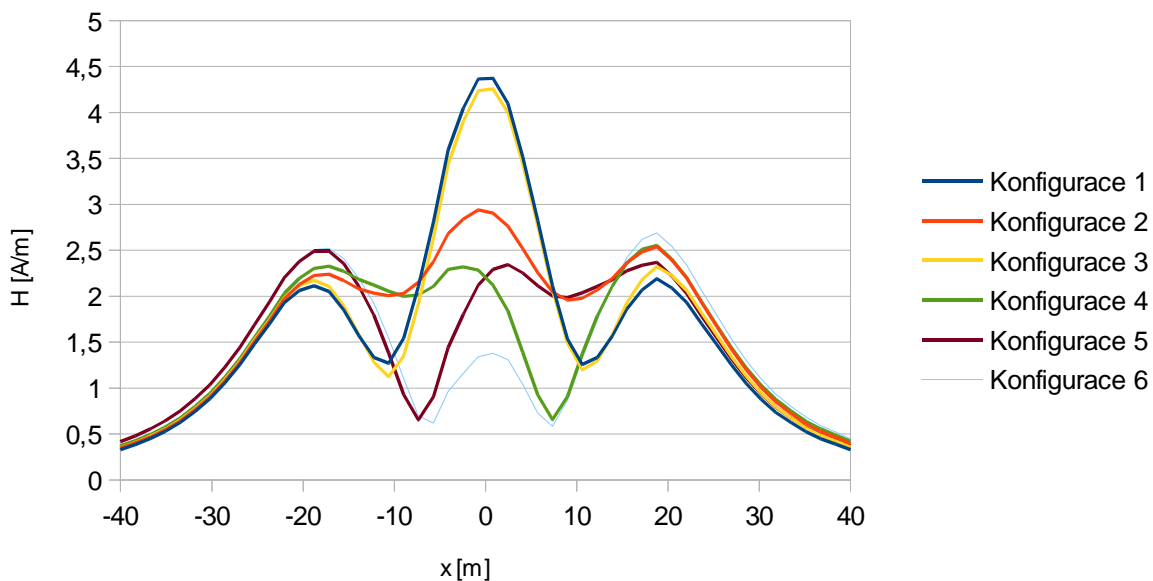
Obr. B.5 Rozmístění elektrod při EEG vyšetření.

## Příloha C

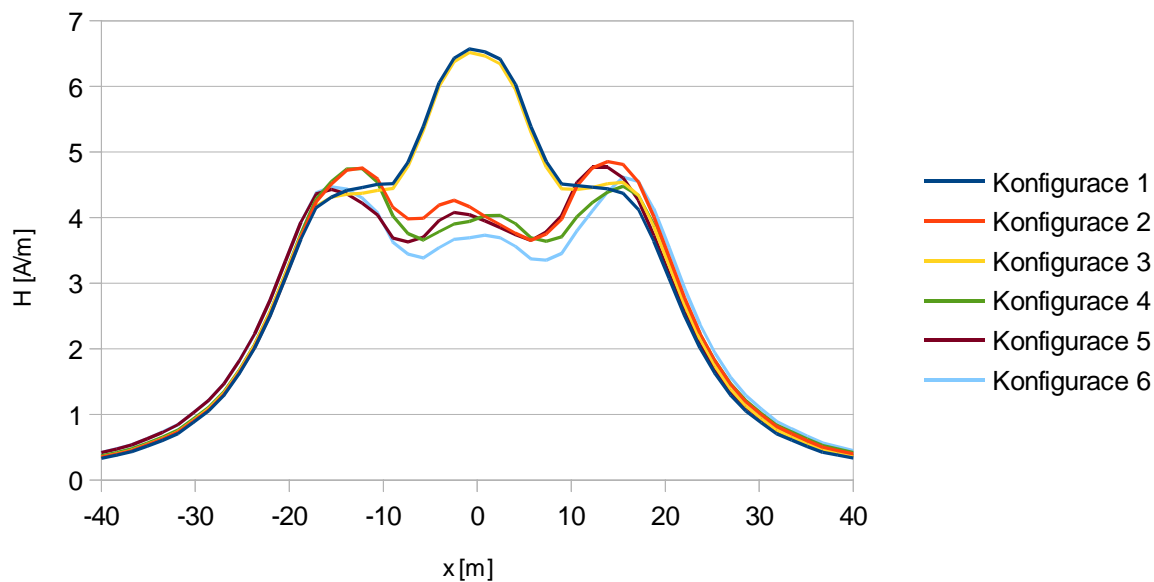
### Grafy intenzit magnetického pole pro stožáry typu Soudek a Dvojitý portál



Obr. C.1 Graf průběhu intenzity magnetického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Soudek v minimální výšce dolních vodičů od země.



Obr. C.2 Graf průběhu intenzity magnetického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Dvojitý portál v 1,5 metru nad zemí.



Obr. C.3 Graf průběhu intenzity magnetického pole pro různé konfigurace fází u stožáru typu Dvojitý portál v minimální výšce dolních vodičů od země.