ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektrické a magnetické pole v okolí nadzemních vedení

Jan Maňhal

Plzeň 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2014/2015**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Jan MAŇHAL**
Osobní číslo:	**E13N0092P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Název tématu:	**Elektrické a magnetické pole v okolí nadzemních vedení**
Zadávající katedra:	**Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

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 živé organismy.
3. Řešte elektrické a magnetické pole v okolí dvou a více nadzemních vedení.
4. Porovnejte zjištěné hodnoty s maximálními přípustnými hodnotami.
5. Zhodnoťte obdržené výsledky.

Rozsah grafických prací:	**podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy:	**30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce:	**tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Mayer, Daniel: Teorie elektromagnetického pole. Plzeň, ZČU v Plzni, 2001.**
2. **Míka, S., Přikryl, P., Brandner, M.: Speciální numerické metody. Numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice. Plzeň, Vydavatelský servis, 2006.**
3. **Benešová, Z., Mayer, D. Základní příklady z teorie elektromagnetického pole. Plzeň, ZČU v Plzni, 2008**

Vedoucí diplomové práce:	**Ing. Lenka Šroubová, Ph.D.** Katedra teoretické elektrotechniky
Datum zadání diplomové práce:	**15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce:	**11. května 2015**

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

L.S.

Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Hlavním náplní diplomové práce je zaměření se na magnetické pole v okolí nadzemních vedení. Výsledky práce jsou zobrazeny v grafech a ukazují magnetické pole kolem vedení v závislosti na typu vedení a typu stožáru.

Klíčová slova

Maxwellovy rovnice, distribuční soustava, AlFe lana, stožáry, numerická analýza, magnetické pole, Agros 2D, metoda konečných prvků

Abstract

The main content of this thesis is to focus on the magnetic field around three-phase overhead lines. The results are depicted in diagrams and show the magnetic field around the lines, depending on the type of lines and the type of towers.

Key words

Maxwell's equations, the distribution system, AlFe wires, towers, numerical analysis, magnetic field, Agros 2D finite element method.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.
Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 10.5.2015 Jan Maňhal

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mé vedoucí diplomové práce Ing. Lence Šroubové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Poděkování si zaslouží i Ing. Jiří Chlasták za pomoc a praktické rady z oblasti projektování vedení. Dále bych rád poděkoval rodičům za umožněné studium a jejich mimořádnou trpělivost během mého studia

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 10

ÚVOD 11

1 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE 12

1.1 MAXWELLOVY ROVNICE 12

1.2 MATEMATICKÝ MODEL ŘEŠENÉHO PROBLÉMU 13

2 VENKOVNÍ VEDENÍ A STOŽÁRY VN / VVN 15

2.1 OCHRANNÁ PÁSMA PŘENOSOVÉHO VEDENÍ 17

2.2 STOŽÁRY POUŽÍVANÉ PRO ROZVOD VN / VVN 19

2.2.1 Typy stožárů 19

2.2.2 Normalizovaný stožár pro NN a VN 21

2.2.3 Rozkročný stožár - Donau 22

2.2.4 Stožár Soudek 23

2.2.5 Šroubovaný nosný stožár - Kočka 24

2.3 ALFE LANA 25

2.3.1 Lana pro hladinu 110 kV 26

2.3.2 Lana pro hladinu 220 kV 27

2.3.3 Lana pro hladinu 400 kV 27

3 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA ELEKTRICKÝCH A BIOLOGICKÝCH SYSTÉMŮ 28

3.1 NEIONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ 28

3.2 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA ELEKTRICKÝCH SYSTÉMŮ 29

3.3 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA BIOLOGICKÝCH SYSTÉMŮ 30

3.3.1 Elektromagnetické pole a jeho vliv na živé organismy 31

3.4 MAXIMÁLNÍ DOVOLENÉ HODNOTY 33

4 MODELOVÁNÍ 35

4.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ 35

4.2 AGROS2D 37

4.3 POSTUP PŘI MODELOVÁNÍ 37

5 ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLADY 41

5.1 MAGNETICKÉ POLE VEDENÍ 400 KV 41

5.2 MAGNETICKÉ POLE VEDENÍ 220 KV 42

5.3 MAGNETICKÉ POLE VEDENÍ 110 KV 43

5.4 MAGNETICKÉ POLE PŘI SOUBĚHU VEDENÍ 45

5.4.1 Souběh vedení 22 kV a 110 kV na jedné konstrukci 45

5.4.2 Souběh vedení 110 kV a 110 kV 46

5.5 MAGNETICKÉ POLE POD KŘIŽOVÁNÍM VEDENÍ 110 KV, 220 KV A 400 KV 48

5.5.1 Křížení vedení 110 kV a 220 kV 49

5.5.2 Křížení vedení 110 kV (dvojité) a 220 kV 50

5.5.3 Křížení vedení 110 kV a 400 kV 51

5.5.4 Křížení vedení 110 kV (dvojité) a 400 kV 52

5.5.5 Křížení vedení 220 kV a 400 kV 53

ZÁVĚR 54

SEZNAM LITERATURY 55

PŘÍLOHY 57

Seznam symbolů a zkratek

D_e	základní elektrická vzdálenost	[m]
U	napětí	[kV]
E	fázor intenzity elektrického pole	[$V.m^{-1}$]
Q	elektrický náboj	[C]
φ	skalární elektrický potenciál	[V]
l	délka vodiče	[m]
ε	permitivita prostředí	[$F.m^{-1}$]
γ	konduktivita	[$S.m^{-1}$]
μ	permeabilita	[$H.m^{-1}$]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
I	proud	[A]
H	intenzita magnetického pole	[$A.m^{-1}$]
E	intenzita elektrického pole	[$V.m^{-1}$]
D	elektrická indukce	[$C.m^{-2}$]
B	magnetická indukce	[T]
J_{ext}	vnější proudová hustota	[$A.m^{-2}$]
C	kapacita	[F]
A	magnetický vektorový potenciál	[$Wb.m^{-1}$]

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na magnetické pole v okolí nadzemních vedení, které bude namodelované v programu Agros 2D.

Diplomová práce je rozdělena do čtyř hlavních částí. V první části popisuji elektrické a magnetické pole a způsoby, kterými se tyto pole počítají.

Druhá část je zaměřena na problematiku venkovních vedení a popisu stožárů, které jsou využívány pro přenos elektrické energie VN a VVN.

Ve třetí části diplomové práce se budu věnovat problematice elektromagnetické kompatibility mezi elektrickými a biologickými systémy, působením elektromagnetického pole na živé organismy a v poslední řadě zde uvedu normy a předpisy, týkající se této problematiky.

Ve čtvrté a páté části diplomové práce se budu věnovat samotnému modelování. Nejprve popíši použitý software (Agros 2D), popíši postup při modelování, dále ukáži modelované případy magnetických polí v okolí nadzemních vedení.

V závěru diplomové práce budou namodelované výsledky zhodnoceny a porovnány s maximálními přípustnými hodnotami, které jsou uvedeny v normách a vyhláškách.

1 Elektromagnetické pole

1.1 Maxwellovy rovnice

Elektromagnetické pole je popsáno v makroskopické teorii pomocí Maxwellových rovnic. Tyto rovnice tvoří základní zákony elektromagnetického pole a byly popsány Jamesem Clerkem Maxwellem již v roce 1865. Maxwellovy rovnice lze zapsat ve dvou tvarech, z nichž jeden je ve tvaru integrálním, druhý tvar rovnic je v diferenciálním tvaru. Rovnice zapsané v integrálním tvaru charakterizují elektromagnetické pole v určité oblasti, naopak rovnice, které jsou zapsány ve tvaru diferenciálním, popisují určitý bod ve zmíněné oblasti. Maxwellovy rovnice jsou čtyři a jejich formulace je uvedena níže. [1]

1. ***První Maxwellova rovnice – Ampérův zákon***
   - Integrální tvar

$$\oint_l \boldsymbol{H}.dl = \boldsymbol{I} + \int_S \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}.\boldsymbol{dS} \tag{1.1}$$

   - Diferenciální tvar

$$\text{rot}\,\boldsymbol{H} = \boldsymbol{J_v} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{1.2}$$

2. ***Druhá Maxwellova rovnice – Faradayův indukční zákon***
   - Integrální tvar

$$\int_l \boldsymbol{E}\,.dl = -\int_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\,.\boldsymbol{dS} \tag{1.3}$$

   - Diferenciální tvar

$$\text{rot}\,\boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{1.4.}$$

3. ***Třetí Maxwellova rovnice – Gaussův zákon***
   - Integrální tvar

$$\oint_S \boldsymbol{D}\,.dS = \boldsymbol{Q} \tag{1.5.}$$

   - Diferenciální tvar

$$\text{div}\,\boldsymbol{D} = \rho_v \tag{1.6.}$$

4. Čtvrtá Maxwellova rovnice – Zákon spojitosti indukčního toku

- Integrální tvar

$$\oint_S \boldsymbol{B} \,.\, dS = 0 \qquad (1.7.)$$

- Diferenciální tvar

$$\mathrm{div}\, \boldsymbol{B} = 0 \qquad (1.8.)$$

Ampérův a Gaussův zákon popisují vztahy mezi nábojovou hustotou volných nábojů ρv, dále mezi hustotou volných proudů J_v a mezi vektory elektromagnetického pole D a H.
Faradayův indukční zákon a zákon o spojitosti indukčního toku popisují obecně platné vlastnosti vektorů E a B. [1]

1.2 Matematický model řešeného problému

Modelování elektromagnetického pole bude prováděno na elektrickém vedení, kde se pohybujeme v malých časových změnách – vyskytuje se zde pole o frekvenci sítě, tedy pole o frekvenci 50 Hz. Díky této frekvenci můžeme zanedbat posuvný proud, který je dán druhým členem pravé strany v první Maxwellově rovnici. Pokud tedy posuvný proud zanedbáme, budou mít použité Maxwellovy rovnice následující tvary. [2] [3]

$$\mathrm{rot}\, \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J_v} \qquad (1.9.)$$

$$\mathrm{rot}\, \boldsymbol{E} = -\frac{\boldsymbol{\partial B}}{\boldsymbol{\partial t}} \qquad (1.10.)$$

$$\mathrm{div}\, \boldsymbol{D} = \rho_v \qquad (1.11.)$$

$$\mathrm{div}\, \boldsymbol{B} = 0 \qquad (1.12.)$$

Při modelování bude uvažován kartézský souřadnicový systém a v jednotlivých oblastech bude uvažováno lineární prostředí. Permeabilita μ bude rovna konstantě a též i elektrická vodivost γ bude rovna konstantě. Při modelování bude uvažován harmonický průběh proudu, díky čemuž bude možné přejít na symbolicko-komplexní zobrazení. [2] [3]

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H} \qquad (1.13.)$$

$$\boldsymbol{B} = \mathrm{rot}\, \boldsymbol{A} \qquad (1.14.)$$

Využijeme-li vztahy 1.13. a 1.14. bude možné popsat elektromagnetické pole parciální diferenciální rovnicí pro fázor magnetického vektorového potenciálu A ve tvaru, který je dán rovnicí 1.15.

$$\frac{1}{\mu}\,\mathrm{rot}\left(\mathrm{rot}\underline{\boldsymbol{A}}\right) + \mathrm{j}\omega\gamma\,\underline{\boldsymbol{A}} = \underline{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{ext}} \qquad (1.15.)$$

Ve vztahu 1.15. $\boldsymbol{J}_{\mathrm{ext}}$ představuje vnější proudovou hustotu a v modelovaných případech bude pravá strana této rovnice rovna nule.

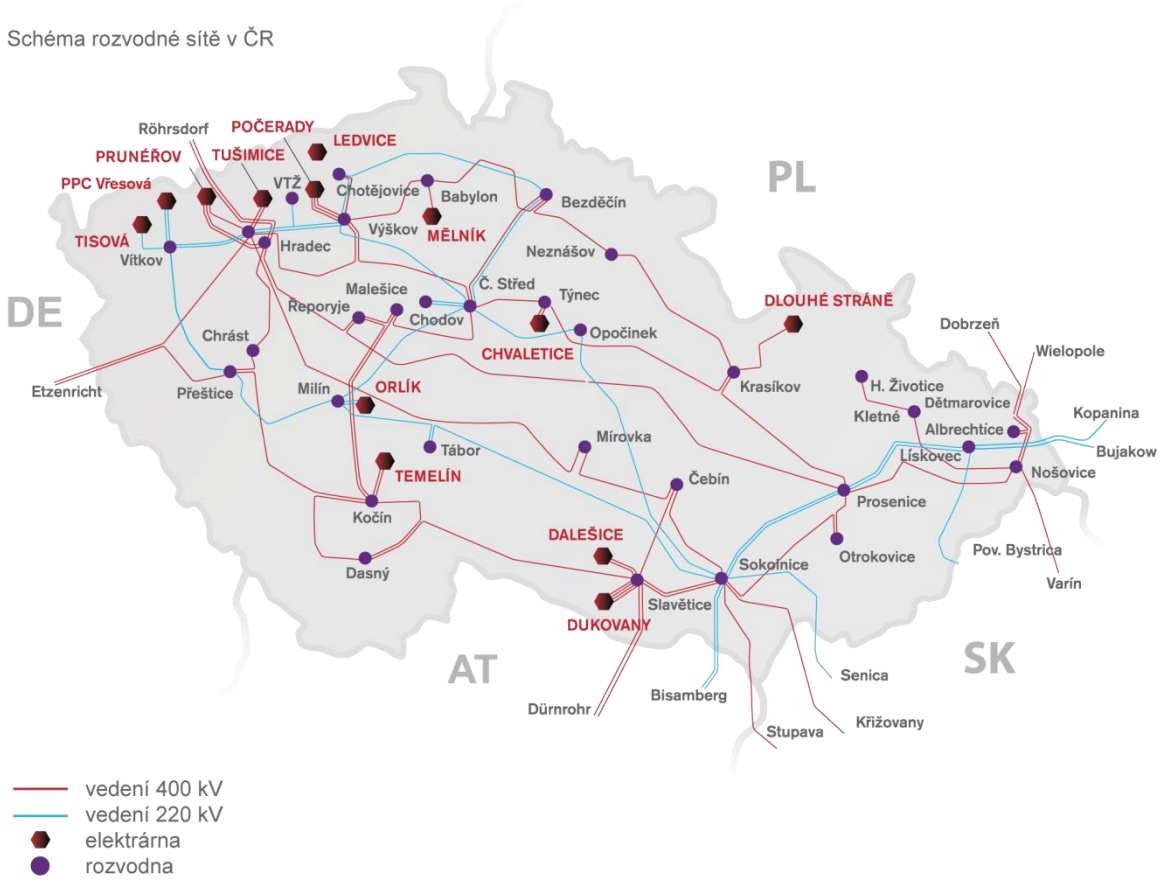
Relativní permeabilita pro vzduch μ_{r} je rovna 1 a měrná elektrická vodivost γ je nulová.

Okrajová úloha bude formulována pro magnetický vektorový potenciál a bude zde definována dvojrozměrná oblast Ω., na jejíž hranici platí okrajová podmínka

$$\underline{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{z}} = 0\ . \qquad (1.16.)\ [25]$$

2 Venkovní vedení a stožáry VN / VVN

Podíváme-li se do začátků průmyslového využívání elektrické energie, zjistíme, že dříve nebylo potřeba rozvodových ani přenosových soustav. Elektrická energie se vyráběla pouze lokálně a to zpravidla pro vlastní spotřebu. Výstavba prvních rozvodných systémů začala až v prvním desetiletí minulého století, zároveň v této době docházelo k výstavbám prvních veřejných elektráren. Jedním z hlavních důvodů, proč docházelo k výstavbám v těchto letech, byl zákon vydaný v roce 1919 a to Zákon o soustavné elektrizaci státu. Funkce a informace o vznikající přenosové soustavě byla charakterizována v propagační brožuře, jež byla vydána v roce 1924. Vydavatelem této brožury byl Zemský úřad na zvelebování živností v Brně. V brožuře byl popsán proces elektrizace, ve kterém bylo snahou vytvořit síť velkých elektráren, využívající k výrobě elektrické energie energii z přírody, dnes známou jako energii z obnovitelných zdrojů a dále pak energii z neobnovitelných zdrojů. [4]



Obr. 2.1 Schéma rozvodné sítě ČR, převzato z [5]

Tab. 2.1 Tabulka s údaji o přenosové soustavě

Typ vedení	Délka	Poznámka
Vedení 400 kV	3 510 km	(z toho dvojité a vícenásobné vedení 1 146 km)
Vedení 220 kV	1 909 km	(z toho dvojité a vícenásobné vedení 1 038 km)
Vedení 110 kV	84 km	(z toho dvojité a vícenásobné vedení 78 km)

Páteřní přenosová síť, podobná té, kterou známe dnes, byla dokončena v 80. letech minulého století. Zmíněná přenosová soustava je zobrazena na obrázku 2.1 a informace k této soustavě jsou v tabulce 2.1. Nyní je převážně tvořena vedením o hodnotě napětí 400 kV. Vedení 220 kV, jehož výstavba byla ukončena kolem 70. let, plní nyní především úlohu doplňkových a záložních vedení. Nyní k přenosové soustavě patří 41 elektrických rozvoden, které využívají 71 transformátorů pro obě základní napěťové hladiny. Soustavy o hodnotě napětí 110 kV, která jsou historicky nejstarší, převzaly postupně v 70. letech úlohu uzlově napájených distribučních sítí. [4]

Páteřní elektroenergetická přenosová soustava 220 kV a 400kV je určena k rozvedení elektrické energie z velkých elektráren do celého území naší republiky a zároveň je součástí mezinárodního propojení Evropy. Elektřinou jsou napájeny distribuční soustavy, které ji dále rozdělují pro koncové uživatele. Přenosová soustava České republiky je napojena přeshraničními vedeními na přenosové soustavy okolních států a tím synchronně spolupracuje s celou elektroenergetickou soustavou Evropy. [4]

Důležitým aspektem přenosové soustavy jsou velikosti přenášeného napětí. Aby ztráty, které vznikají při přenosu elektrické energie, byly co nejmenší, používají se k přenosu na velké vzdálenosti velmi vysoká napětí. Snahou je, aby došlo k omezení ztrát, které vyplívají z Ohmova zákona. Čím větší je hodnota přenášeného napětí, tím menší je proud, který prochází vedením. Ztráty jsou závislé na velikosti proudu, proto je snaha, aby se elektrická energie přenášela na co možná nevyšších napěťových hladinách. V České republice je nejvyšší napěťová hladina rovna 400 kV, v zahraničí, například v Rusku nebo v Číně je možné najít napěťové hladiny o hodnotách napětí 1000 kV. [4]

2.1 Ochranná pásma přenosového vedení

Kolem venkovních vedení se ze zákona zřizují ochranná pásma, která jsou známa jako bezpečnostní koridory. V zákoně je uvedeno, že uvnitř těchto koridorů je zakázáno zřizovat stavby, umisťovat konstrukce, uskladňovat hořlavé a výbušné látky, vysazovat chmelnice a nechávat růst porosty, které jsou vyšší než 3 metry. Ochranná území jsou důležitá, neboť vodiče v závislosti na teplotě vykazují určitý průhyb a pokud by byl průhyb moc velký a v ochranném území se nacházely předměty, které by se mohli přiblížit k vodičům, mohlo by dojít k ohrožení okolí. Teplota, při které dochází k teplotní roztažnosti, je mimo jiné závislá i na klimatických podmínkách (teplota vzduchu, vlhkost) a na zatížení samotného vodiče (při vyšším napětí je vyšší i teplota samotného vodiče a tím větší i průhyb vodiče). [6]

Zároveň je vymezena závaznými normami minimální vzdálenost objektů od živých částí vedení, vodičů pod napětím. Tato hodnota činí minimálně 4 m u vedení 220 kV a minimálně 5 metrů u vedení o hodnotě napětí 400 kV. Zároveň mají tyto vzdálenosti vyloučit i možnost dotyku živých částí vedení s dřevinami, který by následně mohl způsobit zkrat, případně požár.[6]

Ochranné pásmo venkovního vedení elektrické energie je vymezeno svislými rovinami vedenými po obou stranách vedení od krajních vodičů a mění se podle napětí. Ochranné pásmo je uvedeno v tabulce 2.2. U podzemních elektrických vedení je vymezeno ochranné pásmo svislou rovinou po obou stranách krajního kabelu a vzdálenost je uvedena v tabulce 2.3. [6]

Tab. 2.2 Velikost ochranného pásma v závislosti na napěťové hladině – venkovní vedení

Napěťová hladina	Velikost pásma
nad 1 kV do 35 kV	7 m
nad 35 kV do 110 kV	12 m
nad 110 kV do 220 kV	15 m
nad 220 kV do 440 kV	20 m
nad 440 kV	30 m

Tab. 2.3 Velikost ochranného pásma v závislosti na napěťové hladině – podzemní vedení

Napěťová hladina	Velikost pásma
do 110 kV	1m
nad 110 KV	3m

Zároveň je v ochranném pásmu podzemního vedení zakázáno provádět bez souhlasu zemní práce, zřizovat stavby a umisťovat konstrukce, které by znemožňovaly přístup k vedení, vysazovat trvalé porosty a přejíždět mechanismy nad 3 tuny.

U elektrických stanic je ochranné pásmo ve vodorovné vzdálenosti 20 m kolmo na oplocení či obezdění objektu. [6]

V následujících tabulkách jsou uvedeny minimální vzdálenosti elektrických vedení od země a jednotlivé vzdálenosti vodičů od sebe.

Tab. 2.4 Minimální vzdálenost vodičů od země, [13]

Druh vedení	Místa volně [m]	
	přístupná	nepřístupná
do 1 kV - mimo vedení nad zemědělskými plochami	5	1
do 1 kV - nad zemědělskými plochami	6	1
10 až 110 kV	6	3
220 kV	7	4
400 kV	8	5
sdělovací vedení na stožárech 10 až 35 kV	5	-

Tab. 2.5 Nejmenší dovolené vzdálenosti mezi vodiči, [13]

Vodič s vyšším napětím [kV]	Nejmenší vzdálenost [cm] od vodiče s napětím						
	do 1 kV	1 až 10 kV	22 kV	35 kV	110 kV	220 kV	400 kV
do 1	20	-	-	-	-	-	-
1 až 10	32	22	-	-	-	-	-
22	40	30	30	-	-	-	-
35	50	40	40	40	-	-	-
110	-	-	-	-	90	-	-
220	-	-	-	-	190	190	-
400	-	-	-	-	340	340	340

2.2 Stožáry používané pro rozvod VN / VVN

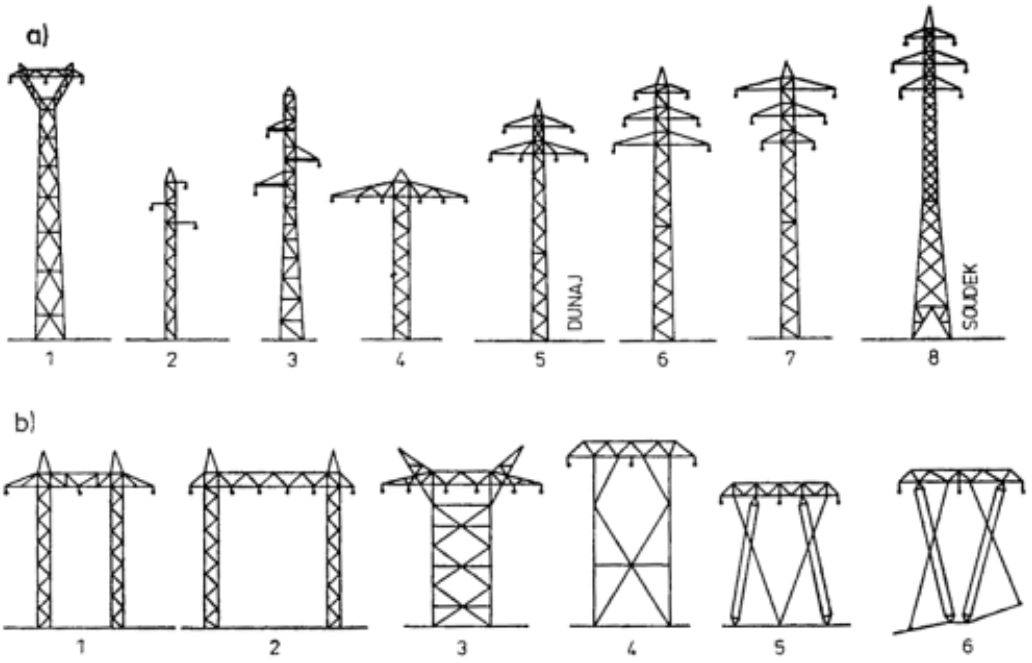
Přenosová soustava se skládá z různých prvků, které plní specifické funkce. Stožáry mají nosnou funkci a zajišťují fyzické oddělení jednotlivých fází vedení

Páteřní elektroenergetická soustava ČEPS vede velmi vysoké napětí 220 kV a 400 kV. To znamená, že se v celorepublikové elektrizační soustavě odlišuje parametry svých stožárů, které jsou vyšší a mohutnější. Výběr určitého typu stožáru je převážně ovlivňován požadavky na pevnost, životnost, trasou vedení, klimatickými a povětrnostními podmínkami a zvolenou napěťovou hladinou. Stožáry jsou konstruovány tak, aby odolaly extrémním povětrnostním vlivům. Musejí odolávat námrazám a větru o síle vichřice, tedy o rychlosti minimálně 120 km/h.

Nadzemní část základu stožáru tvoří zpravidla čtyři betonové válce o průměru zhruba 90 cm a výšce minimálně 40 cm nad terénem. Do každého z válců je ukotven jeden rohový úhelník tvořící nosnou část stožárové konstrukce. Celková plocha půdy, kterou základy stožárů průměrně zaberou včetně ochranného pásma o šířce 1 m je cca 60 m^2. [6]

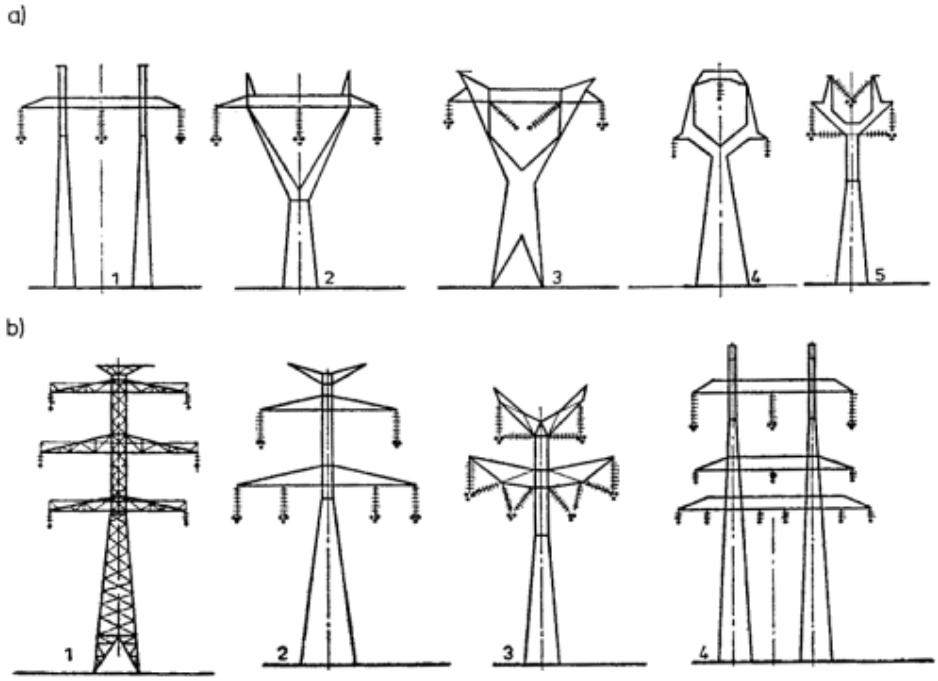
2.2.1 Typy stožárů

Výběr správného stožáru je charakterizován parametry vedení, mezi které patří výkon, napětí, systém, vodiče, zemnící lana a izolátory, dále záleží na geometrii stožáru a uspořádáním vodičů. Dalšími parametry při výběru správného stožáru jsou funkce na trase vedení, klimatické podmínky, zatížením stožárů vodícími lany a v neposlední řadě i na použitém materiálu. Jedním ze souhrnných hledisek při výběru stožáru může být velikost napětí, podle kterého můžeme rozlišovat jednotlivé typy stožárů.



Obr. 2.2 Stožáry používané pro 110 kV a pro 220 kV, převzato z [7]

Na obrázku 2.2 můžeme vidět, že pro napětí 110 kV používáme lehké konstrukce, pro napětí 220 kV používáme stožáry podobné stožárům pro 110 kV, ale tyto stožáry jsou vyšší a jsou více namáhány. Pro napětí 440 kV jsou používány těžké konstrukce – důvodem jsou těžké vodiče, velké rozestupy a velké rozměry. Tyto stožáry jsou zobrazeny na obrázku 2.3. [7]



Obr. 2.3 Stožáry používané pro 400 kV, převzato z [7]

Samotné stožáry rozlišujeme i podle toho, kde se stožár na trase vedení nachází. Používáme poté stožáry nosné, vyztužení kotevní stožáry a stožáry rohové.

- **Nosné stožáry**

  Jedná se o stožáry, které jsou používány na přímé trase a vodiče jsou na těchto stožárech zavěšeny pomocí svislých izolátorových závěsů. Vodorovné složky tahů se na izolátorech ruší, proto je stožár namáhán jen od tlaku větru na stožár.

- **Vyztužené kotevní stožáry**

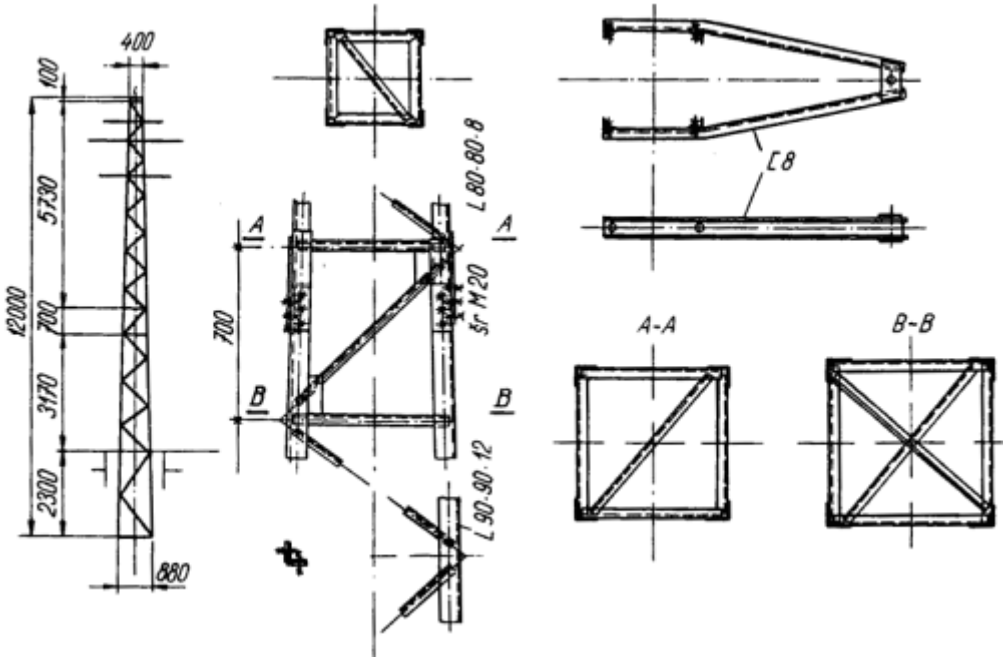
  Na trase tvoří pevné body. Vodiče jsou ke stožáru připojeny pomocí kotevních izolátorových závěsů a jsou namáhány plným tahem vodičů. Samotný vodič přechází přes izolátory tzv. přeponkou, která není mechanicky namáhána. Tyto stožáry jsou důležité i pro samotné napínání vodičů, jejich počet a poloha je závislá na postupu montáže vedení.

- **Rohové stožáry**

  Jsou používány v lomech trasy, kde mohou být jako nosné, nebo zároveň i výztužné. Tyto stožáry přenášejí výslednici tahů ve vodičích. [7]

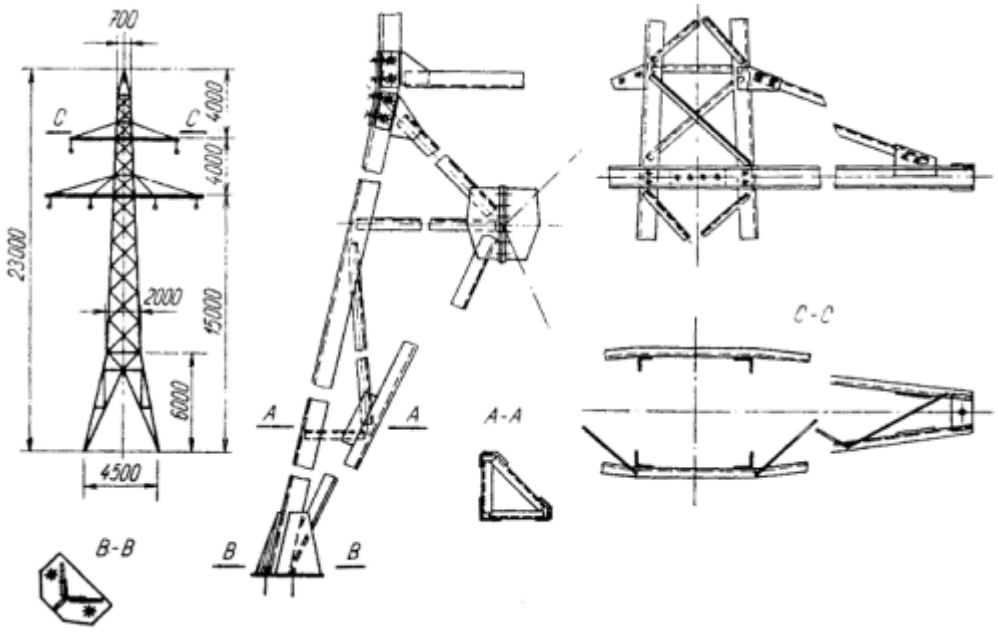
2.2.2 Normalizovaný stožár pro NN a VN

Tento typ stožárů je používán více pro nízké napětí, než pro vysoké napětí. Normalizace u těchto stožárů je odvozena od standardních výšek a technické vybavení stožárů závisí na velikosti elektrického napětí. V příčném řezu má tento typ stožáru tvar pravidelného čtyřúhelníku. Samotná konstrukce je z jednoduchých úhelníků, konzolky jsou z U-profilů. Spodní díl stožáru je zabetonován.[8]



Obr. 2.4 Normalizovaný stožár pro NN a VN, převzato z [8]

2.2.3 Rozkročný stožár - Donau

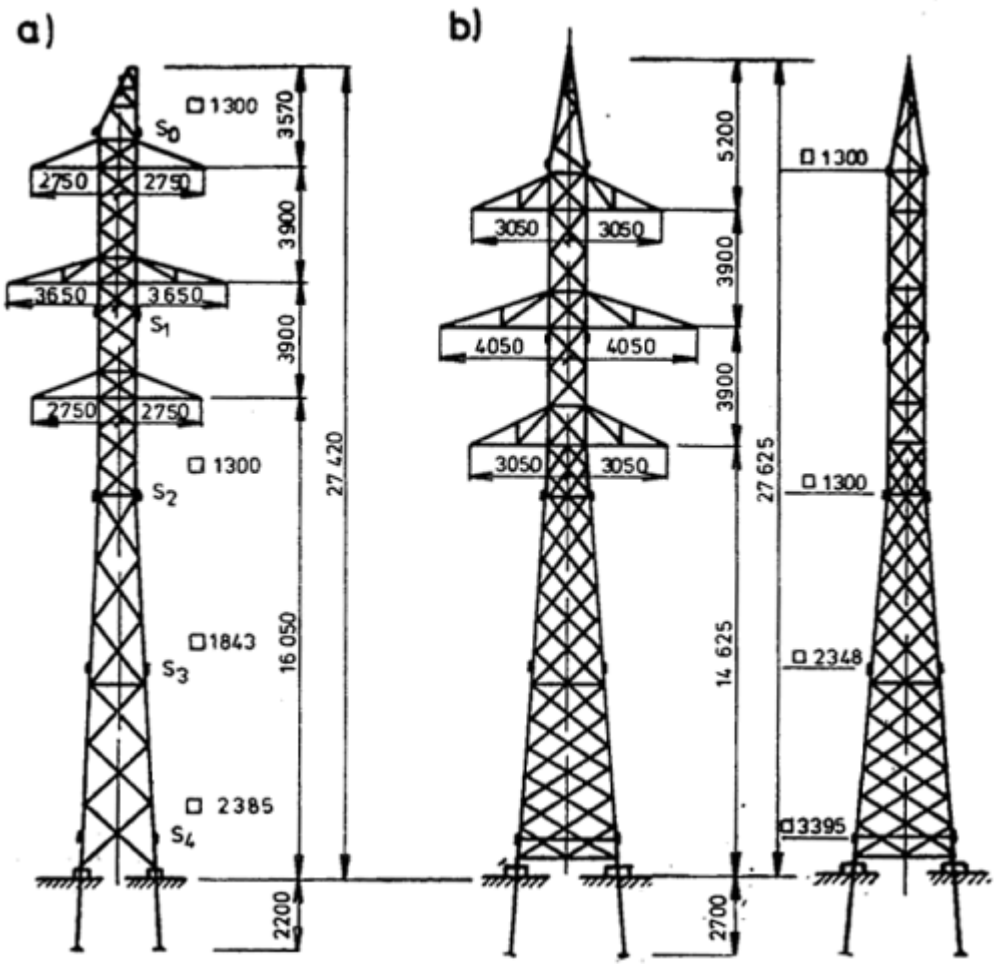


Obr. 2.5 Rozkročný stožár, převzato z [8]

Jedná se o jedno jednokřídlový stožár, který je nad základem rozkročen. Základy tohoto stožáru jsou odděleny a samotný stožár je ukotven pomocí kotevních šroubů.[8]

2.2.4 Stožár Soudek

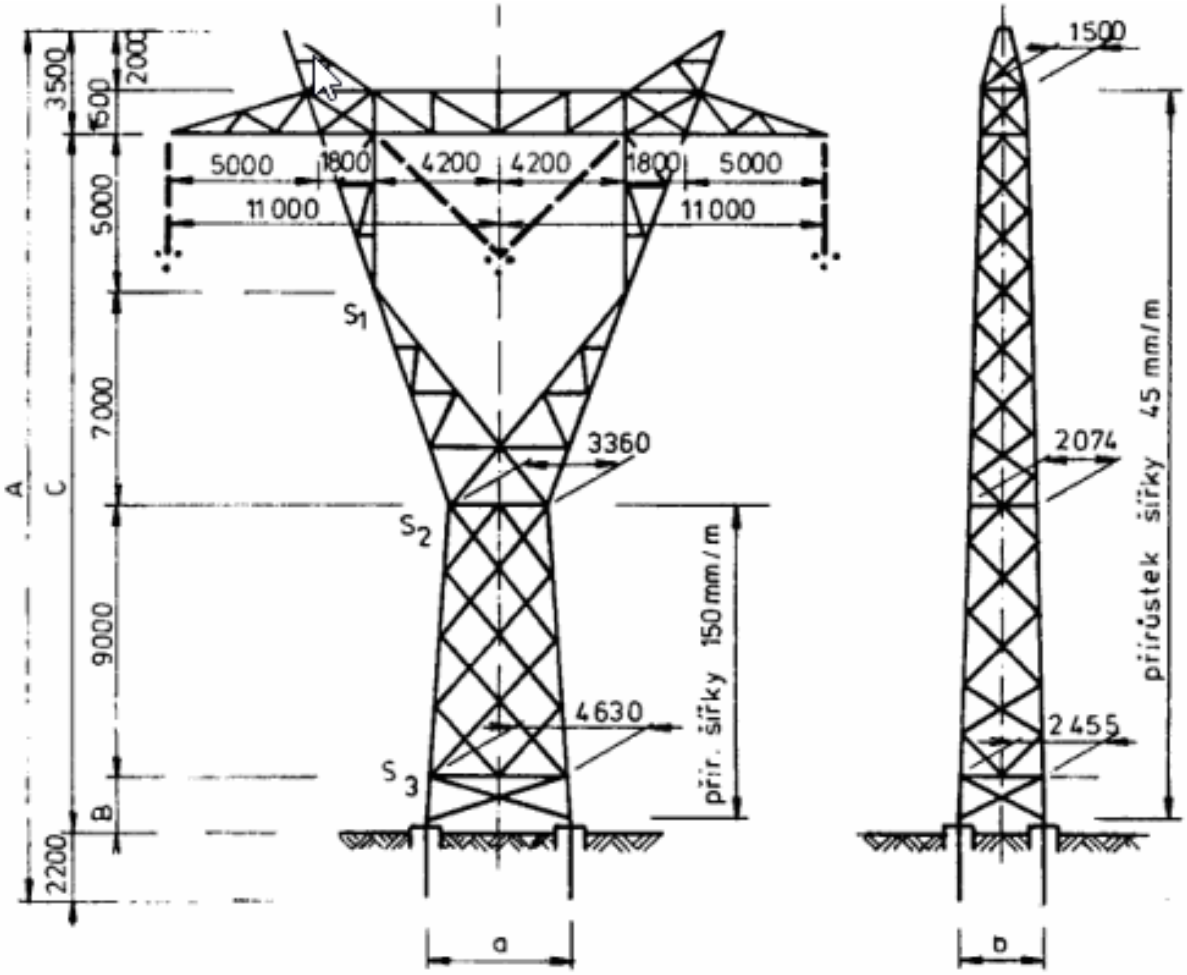
Na obrázku 2.6 je zobrazen nosný a vyztužený stožár pro těžké vodiče, typu "soudek". Stožár je v místě, kde jsou konzole pro vodiče konstantního průměru, ve spodní polovině má průřez proměnný. Výztužný stožár, který je více namáhán ohybovými momenty a kroucením je tvarově podobný, má však tlustější profily a větší výplň. U vyšších vedení jsou stožáry hmotnější a mají větší rozměry. [8]



Obr. 2.6 Stožár soudek(nosný a vyztužený), převzato z [8]

2.2.5 Šroubovaný nosný stožár - Kočka

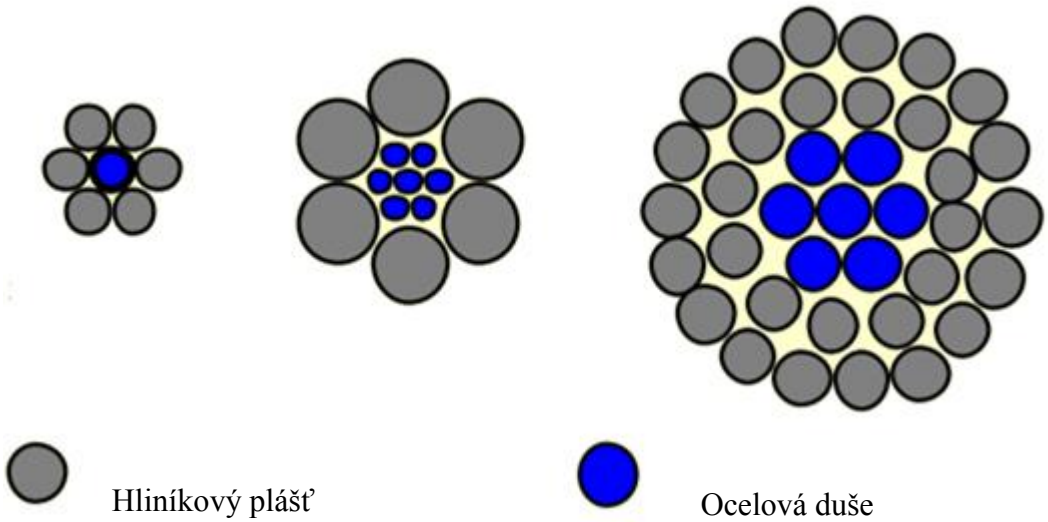
Tento typ stožáru je určen pro přenosovou hladinu 400 kV. Je určen pro jednoduché vedení a tvoří ho stožáry s "oknem" uprostřed. Stožár je navrhnut pro dvě zemnící lana, která jsou na vrcholech konstrukce a 1 x 3 x 3 sdružené fázové vodiče v horizontální rovině. [8]



Obr. 2.7 Šroubovaný nosný stožár typu Kočka, převzato z [8]

2.3 AlFe lana

V elektroenergetice se nejčastěji pro rozvod elektrické pomocí venkovního vedení používají holá venkovní vedení – známá jako AlFe lana. Tyto lana nacházejí použití v hladinách NN, VN a VVN. Popisovaná AlFe lana jsou používána ve všech námrazových oblastech, odolávají běžným povětrnostním podmínkám (konstruována na nárazy větru do 120 km/h) a znečištění. Podle názvu lana je patrné, že jedna část lana je tvořena elektrovodným hliníkem (Al 99,5 %) a druhá část lana – duše - je tvořena z ocelového drátu, případně ze slaněného ocelového drátu. Ocelové nosné dráty jsou zároveň žárově zinkovány, čímž se zlepší jejich odolnost proti korozi. Samotná konstrukce lana je soustředná a jednotlivé vrstvy lana jsou stáčeny v opačném směru, aby se zabránilo případnému rozplétání lana. [9]



Obr. 2.8 Konstrukce AlFe lana, převzato z [9]

Vodiče pro venkovní vedení a jejich průřezy se pro jednotlivé napěťové hladiny příliš neliší, neboť je snahou, aby přenášené výkony byly podobné jejich přirozenému výkonu. Také jinak výkonu, při kterém je jejich účinnost nejvyšší a přitom vedení využívat co nejlépe. [10]

V tabulce 2.6 jsou uvedeny hodnoty jmenovitého proudu, který mohou jednotlivá lana přenášet. Tyto hodnoty vycházejí z normy ČSN 02 4210.

Tab. 2.6 Zatížitelnost AlFe lan dle ČSN 02 4210, [10]

Jmenovitý průřez vodiče [mm2]	AlFe3 In [A]	AlFe4 In [A]	AlFe6 In [A]	AlFe8 In [A]
16	-	-	78	-
25	-	-	104	-
35	143		140	-
50	180	198	165	-
70	227	233	208	-
95	280	269	267	-
120	334	314	329	-
150	362	365	356	-
185	423	426	421	-
210	496	469	451	-
240	546	502	490	-
300	584	597	574	-
350	680	643	660	-
450	-	-	775	750
500	-	-	-	823
670	-	-	-	1023

2.3.1 Lana pro hladinu 110 kV

V této hladině napětí se setkáváme buď s jednoduchými lany, nebo s lany, které tvoří dvojsvazky. V tabulce 2.7 jsou uvedena používaná lana.

Tab. 2.7 AlFe lana pro hladinu 110 kV, [10]

Jednoduchá lana průřez [mm2]	Dvojsvazky průřez [mm2]
185	2 x 350
240	2 x 670
450	-
680	-

2.3.2 Lana pro hladinu 220 kV

V této hladině se opět setkáváme s možností, že vodiče jsou taženy samostatně, nebo jako opět jako dvojsvazek. V tabulce 2.8 jsou uvedeny průřezy používaných lan.

Tab. 2.8 AlFe lana pro hladinu 220 kV, [10]

Jednoduchá lana průřez [mm2]	Dvojsvazky průřez [mm2]
350	2 x 210
450	-

2.3.3 Lana pro hladinu 400 kV

V této hladině napětí se nepoužívají lana jednoduchá a nepoužívají se ani dvojsvazky. Rozvod elektřiny je realizován pomocí AlFe lan, která jsou v trojsvazku. V tabulce 2.9 jsou uvedeny lana pro tuto napěťovou hladinu.

Tab. 2.9 AlFe lana pro hladinu 400 kV, [10]

Jednoduchá lana průřez [mm2]	Dvojsvazky průřez [mm2]	Trojsvazky průřez [mm2]
-	-	3 x 450
-	-	3 x 500

3 Elektromagnetická kompatibilita elektrických a biologických systémů

V této kapitole se budu věnovat elektromagnetické kompatibilitě elektrických a biologických systémů. V první části této kapitoly popíši neionizující záření, následně se budu věnovat elektromagnetické kompatibilitě elektrických systémů a poté elektromagnetické kompatibilitě biologických systémů. Poté přejdu k hygienickým normám a předpisům, které se týkají dané problematiky. K této problematice elektrického a magnetického pole se vztahuje Nařízení vlády č. 1/2008 Sb. O ochraně zdraví před neionizujícím zářením.

3.1 Neionizující záření

Elektrické pole, magnetické pole a elektromagnetické pole se řadí do neionizujícího záření, kam spadá i viditelné světlo, ultrafialové zářená, infračervené záření a laserové záření. Označení pole se používá zcela obecně, pojem záření se používá při relativně vyšších kmitočtech (od desítek kHz). Zároveň lze do této skupiny zařadit i radiové záření a mikrovlny. [11]

- **Elektrické pole**

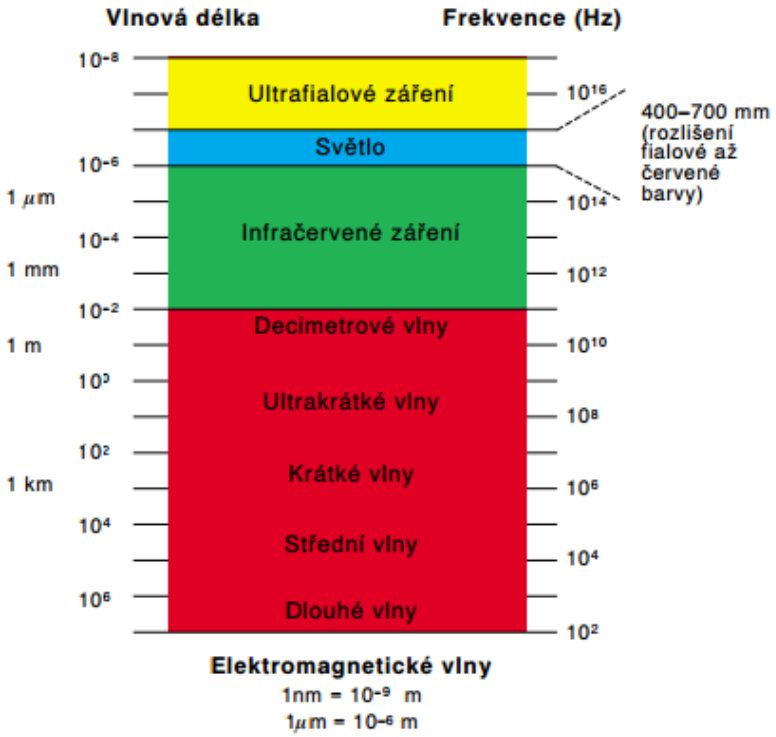
  Elektrický náboj, který se nepohybuje, vytváří ve svém okolí elektrostatické pole. Intenzita tohoto pole je vyjádřena jednotkou $V.m^{-1}$.

- **Magnetické pole**

  Elektrický náboj, který se nyní pohybuje, vytváří kolem sebe elektrodynamické pole a zároveň pole magnetické. Intenzitou magnetického pole je $A.m^{-1}$. Magnetické pole může být také charakterizováno silou, kterou toto pole působí na jednotkový proudový element – magnetickou indukcí B, která je v jednotkách T.

- **Elektromagnetické pole**

  Elektromagnetické pole je nevázané na elektrické náboje a vzniká šířící se časovou změnou elektrického a magnetického pole.



Obr. 3.1 Neionizující záření, převzato z [11]

3.2 Elektromagnetická kompatibilita elektrických systémů

Problematikou vlivu elektromagnetického pole na elektrické systémy se podrobně zabývá elektromagnetická kompatibilita. Definuje schopnost elektrických systémů nebo elektrických zařízení fungovat ve svém elektromagnetickém prostředí a během tohoto fungování nevytvářet nechtěné elektromagnetické rušení pro ostatní věci v tomto prostředí. Zdroji těchto rušení jsou většinou elektrické motory, energetické prvky, zářivky a samotné venkovní vedení. [12]

Oproti vlivu na lidský organismus, je u elektrických zařízení mnohem více aspektů, jak a kdy dochází ke vzájemnému působení. Jedním z těchto působení je stejné jako u člověka – indukování elektrických proudů. Tyto indukované proudy vznikají působením střídavého magnetického pole a vznikají přímo v přístrojích, přesněji řečeno v jejich elektrických obvodech a v jejich vodivých částech. Snahou je konstruovat elektrické přístroje tak, aby indukující se proudy byly co nejmenší, nejslabší a jejich působení na elektrický přístroj bylo co nejvíce eliminováno. [12]

Druhou možností, jak může elektromagnetické pole ovlivňovat přístroje je působení elektromagnetického pole na svazky elektronů. Do této skupiny přístrojů patří staré televizory a monitory, které využívají elektronkovou, též také označovanou jako vakuovou obrazovku.

Můžeme sem zařadit i speciální přístroje, mezi které například patří hmotnostní spektrograf, nebo elektronový mikroskop. Magnetické pole dokáže u televizorů, nebo monitorů rozostřit obraz, rozkmitat obraz, nebo dokonce změnit jeho barevné rozložení – to pouze v případě, že magnetické pole obsahuje i statickou složku. K těmto poruchám dochází již při hodnotách magnetické indukce kolem 5 μT a frekvenci 50 Hz. Hodnoty, při kterých dochází k ovlivňování samotných zařízení, jsou mnohem níže, než je stanovena minimální hodnota nepřetržité expozice magnetické indukce pro ostatní osoby, která je stanovena na 0,1 mT. [12]

Rušení vzniká i na zařízeních venkovního vedení. Vzniká na rozvodných zařízeních a vedeních VN a ZVN. Na těchto zařízeních se generuje vysokofrekvenční šum a to v širokém rozsahu – 150 kHz -30MHz. Takovéto rušení dokáže ovlivnit televizní a rozhlasové vysílání, které používá amplitudovou nebo frekvenční modulaci. Nad 300 MHz se působení vysokofrekvenčního šumu takřka eliminuje. Za zdroje vysokofrekvenčního rušení považujeme stejnosměrná vedení, střídavá elektrická vedení, izolátory, které jsou vysoce namáhány, nebo nedokonalá spojení přenosového vedení. [14]

3.3 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

O působení elektromagnetického pole na zdraví v okolí vedení vysokého napětí, případně v blízkosti vodičů, kterými protéká proud, se lze dočíst v literaturách, článcích na internetu a podobně. Aby nedocházelo k nechtěnému působení na lidský organismus, případně na jiné biologické systémy, bylo vydáno nařízení vlády o Ochraně zdraví před neionizujícím zářením, kde jsou stanoveny hygienické limity i pro nízkofrekvenční elektrická a magnetická pole. Důležité hodnoty z této vyhlášky jsou vypsány v následující kapitole.

V nařízení vlády se přípustnost expozice elektrického a magnetického pole s frekvencí do 100 kHz posuzována dle hodnoty hustoty elektrických proudů, které jsou v tělech člověka, případně v jiných živých organismech vyvolávány. U frekvencí, které jsou v rozsahu od 100 kHz do 10 MHz, je možné najít krom indukovaných proudů ve tkáních také ohřev biologických tkání. Pro následné posuzování vlivu expozice je zapotřebí zkoumat oba vlivy najednou. Vyskytujeme-li se v oblasti nad 10 MHz, posuzujeme při hygienickém vyhodnocování expozice již jen samotný ohřev tkáně.

Při vyhodnocování vlivu energetické sítě se pohybujeme v hodnotách frekvence 50 Hz, proto vyhodnocujeme jen hustotu elektrických proudů, které jsou vyvolány vnějším elektrickým a magnetickým polem. V této oblasti frekvencí, ve které je osoba vystavena expozici, se většinou posuzují pouze magnetická pole. Nízkofrekvenční elektrická pole nabývají v reálných situacích nízké hodnoty, neboť sítě, které generují elektrická pole, mají velkou impedanci. Indukované elektrické proudy účinkují jak na tělesnou tkáň, tak i na nervovou soustavu. Účinek těchto proudů je okamžitý a při hodnocení se posuzují efektivní hodnoty přes periodu, pouze u frekvencí, které jsou vyšší než 1 kHz je možné provést tzv. středování po dobu jedné sekundy. Vyhodnocujeme-li účinky tepelného působení polí s frekvencí nad 100 kHz, provádíme středování po dobu šesti minut. A v případě, kdy vyhodnocujeme statické magnetické pole, kdy k indukování elektrických proudů v těle dochází pohybem těla, je pro hygienické hodnocení expozice zaměstnanců použit průměr magnetické indukce za dobu, za kterou je tomuto poli osoba vystavena během pracovní směny. [12] [15]

3.3.1 Elektromagnetické pole a jeho vliv na živé organismy

Těla všech živých organismů jsou tvořena buňkami, které tvoří nejmenší stavební kameny a které mohou žít sami o sobě. Každá buňka má danou strukturu a je tvořena buněčným tělem, buněčným jádrem a buněčnou membránou – blánou. Jsou však i buňky, které buněčné jádro nemají a tím jsou červené krvinky. Buňky v tělech organismů jsou specializované, což znamená, že se mohou například smršťovat a roztahovat, jiné mohou například přijímat složky potravy a vstřebávat ji. Bylo prokázáno, že elektromagnetické pole může působit na tyto buňky a buď je ovlivňovat pozitivně, nebo negativně. Působení magnetického pole na organismy lze rozdělit na tři druhy, které uvádí do chodu biologické reakce na všech úrovních.

- Elektronové interakce – k tomuto efektu dochází na atomární a subatomární úrovni. Dochází k přenosu elektronů mezi jednotlivými molekulami a výsledkem působení je urychlení či zpomalení chemických reakcí.
- Elektromechanický efekt – dochází ke změně orientace některých makromolekul (především kyseliny ribonukleové, desoxyribonukleové, bipolárních molekul a například vody), změn některých enzymů a je ovlivňována i propustnost buněčných membrán.

- Magnetoelektrický jev – týká se indukce vířivých proudů a elektrických potenciálů na mikroanatomických a i větších strukturách živých organismů.

Dle výše vypsaných druhů působení magnetického pole na organismy můžeme usoudit, že se v buňkách při stále magnetické indukci a kmitočtu bude velikost indukovaného elektrického potenciálu měnit v závislosti na velikosti buňky. Tato velikost bude přibývat s velikostí buňky, takže se bude týkat hlavně buněk nervových a buněk svalových. Indukované elektrické potenciály vyvolávají změny při šíření vzruchů v nervových vláknech, dochází ke změnám intenzity látkové výměny buněk a změny v činnosti nervových buněk v centrálním nervovém systému. Pro ukázání vlivu magnetické indukce a indukovaných proudů na organismy poslouží tabulka 3.1, kde je vidět reakce organismu na tyto podměty – na střídavé a pulzní magnetické pole o kmitočtu 3 až 3000 Hz. [24]

Tab. 3.1 Vliv elektromagnetického pole na organismus, [24]

Magnetická indukce (mT)		Indukovaný proud (mA/m)	Reakce organismu
Hlava	Trup		
250	60	1000	**značné zdravotní nebezpečí**, možné extrasystoly a ventikulární fibrilace
250 - 25	60 - 6	1000 - 100	možné zdravotní poškození, změny v dráždivosti centrálního nervového systému
25 - 2,5	6 - 0,6	100 - 10	**snadnější hojení ran, výrazný terapeutický efekt, příznivý vliv na nervový systém**
2,5 - 0,25	0,6 - 0,06	10 -1	minimální biologický efekt
0,25	0,06	1	žádný efekt

Jak je možné vidět v tabulce, elektromagnetická pole mohou pomáhat i škodit. Pokud se elektromagnetické pole používají v požadovaných mezích, mohou být pro organismy přínosem. Toho je využíváno hlavně v lékařství, kde se setkáváme jak s přístroji, které slouží k léčbě, nebo například s přístroji, které slouží ke zjišťování zdravotního stavu pacienta. Patří sem metody vyšetření zvané magnetická rezonance, EKG (elektrokardiografie), EMG (elektromyografie) nebo například EEG (elektroencefalografie).

3.4 Maximální dovolené hodnoty

Jak již bylo napsáno v úvodu kapitoly, problematikou elektrického a magnetického pole se zabývá Nařízení č. 1/2008 Sb. O ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Toto nařízení upravuje hodnoty intenzity elektrického a magnetického pole, v případě nepřetržité expozice.

Můžeme zde nalézt hodnoty pro různé frekvence, avšak pro tuto práci je nejdůležitější frekvence 50 Hz. Pro frekvenci 50 Hz je maximální dovolená intenzita elektrického pole pro zaměstnance, kteří jsou vystaveni neustálé expozici 10 kV/m, pro ostatní osoby je tato hodnota 5000/f V/m, kdy po dosazení frekvence dostaneme hodnotu 0,1 kV/m.

Maximální hodnota magnetické indukce, pro nepřetržitou expozici a pro zaměstnance dosahuje hodnoty 0,5 mT, pro ostatní osoby je tato hodnota 0,1 mT. [16]

Krom nařízení vlády se problematikou zabývají i různé normy. Jedna z norem, která se týká problematiky je norma – elektrotechnické předpisy ČSN 33 2040, nesoucí název Ochrana zdraví před účinky elektromagnetického pole 50 Hz v pásmu vlivu zařízení elektrizační soustavy. Tato norma je podle § 3 zákona č. 142/1991 Sb., o československých technických normách, ve znění zákona č. 632/1992 Sb., závazná v působnosti Českého úřadu bezpečnosti práce na základě jeho požadavku. Norma stanovuje požadavky na úroveň intenzity elektromagnetického pole v okolí zařízení elektrizační soustavy a dále v kapitole třetí určuje přípustné intenzity elektrického pole, maximální přípustnou dobu pobytu a podobně. ČSN 33 2040 byla vydána v lednu 1993 a nahradila normu ČSN 34 2040 z října roku 1979.

Normou definované pásmo elektrického pole v okolí zařízení elektrizační soustavy je takové, kde intenzity elektrického pole přesahují hodnotu 1 kV/m a to ve výšce 1,8 metru nad zemí. Zároveň je zde definované i pásmo magnetického pole, jako pásmo, ve kterém hodnota magnetické indukce pole přesahuje hodnotu 0,1 mT.

Ve třetí kapitole normy jsou určeny přípustné hodnoty intenzity elektrického pole a maximální přípustná doba pobytu v těchto pásmech. Pokud se v definovaném pásmu vyskytuje osoba s elektrotechnickou kvalifikací, nebo se vyskytuje v okolí definovaného pásma a provádí zde práci, je maximální přípustná intenzita elektrického pole ve výšce 1,8 metru nad zemí 15 kV/m. Dojde-li k překročení této stanovené hodnoty, musí být podle toho upravena doba pobytu na 1,5 hodiny za den při intenzitě elektrického pole do 20 kV/m, v případě, kdy je intenzita v rozmezí 20 – 25 kV/m, je dovolený čas pobytu pouze 30 minut za den. Pro osoby v obecně přístupných místech elektrizační soustavy je stanovena maximální

úroveň intenzity elektrického pole na 10 kV/m. Tato hodnota opět platí pro výšku 180 cm nad úrovní terénu. Hodnoty, které upravuje norma ČSN 33 2040 jsou shrnuty v tabulce 3.1. [17]

Tab. 3.1. Norma ČSN 33 2040

Definice vlivu pásma ve výšce 1,8m	B ≥ 0,1 mT	E ≥ 1 kV/m
Povolená doba pobytu v pásmu	≤ 15kV/m	neomezeně
	15 - 20 kV/m	1,5 hod / den
	20 - 25 kV/m	30 min / den
Volně přístupná místa el. Soustavy	max. 10kV/m	

Další normou, na kterou bude přihlíženi při modelování magnetického pole v okolí vedení je norma ČSN 50 341-1 – Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45 kV – Část první – Všeobecné požadavky – společné specifikace. Zde můžeme nalézt základní elektrickou vzdálenost De, která vymezuje nejmenší přípustnou vzdálenost mezi živými vodiči, živými částmi elektrizační soustavy a zařízeními, která mají potenciál země během normálního provozu sítě. Tato vzdálenost závisí na velikosti napětí sítě a je uvedena v tabulce 3.2, kde jsou zároveň hodnoty nejkratší vnější vzdálenosti. Nejkratší vnější vzdálenost chrání veřejnost od přeskoku ze živých částí silového vedení. [18]

Tab. 3.2 Norma ČSN EN 50 341 – 1

Napětí sítě [kV]	De [m]	Typ oblasti	Vzdálenost od země
123	1	Krajina bez stromů	5 + De
245	1,7	Komunikace, železnice	6 + De
420	2,8	Rekreační plochy	7 + De

4 Modelování

V této kapitole se diplomová práce bude věnovat již samotnému modelování. Bude zde popsán program Agros2D ve kterém se budou simulovány příklady z elektromagnetického pole, dále zde bude popsána metoda konečných prvků, kterou program využívá pro výpočty řešení a následně zde popíši i průběh modelování vedení.

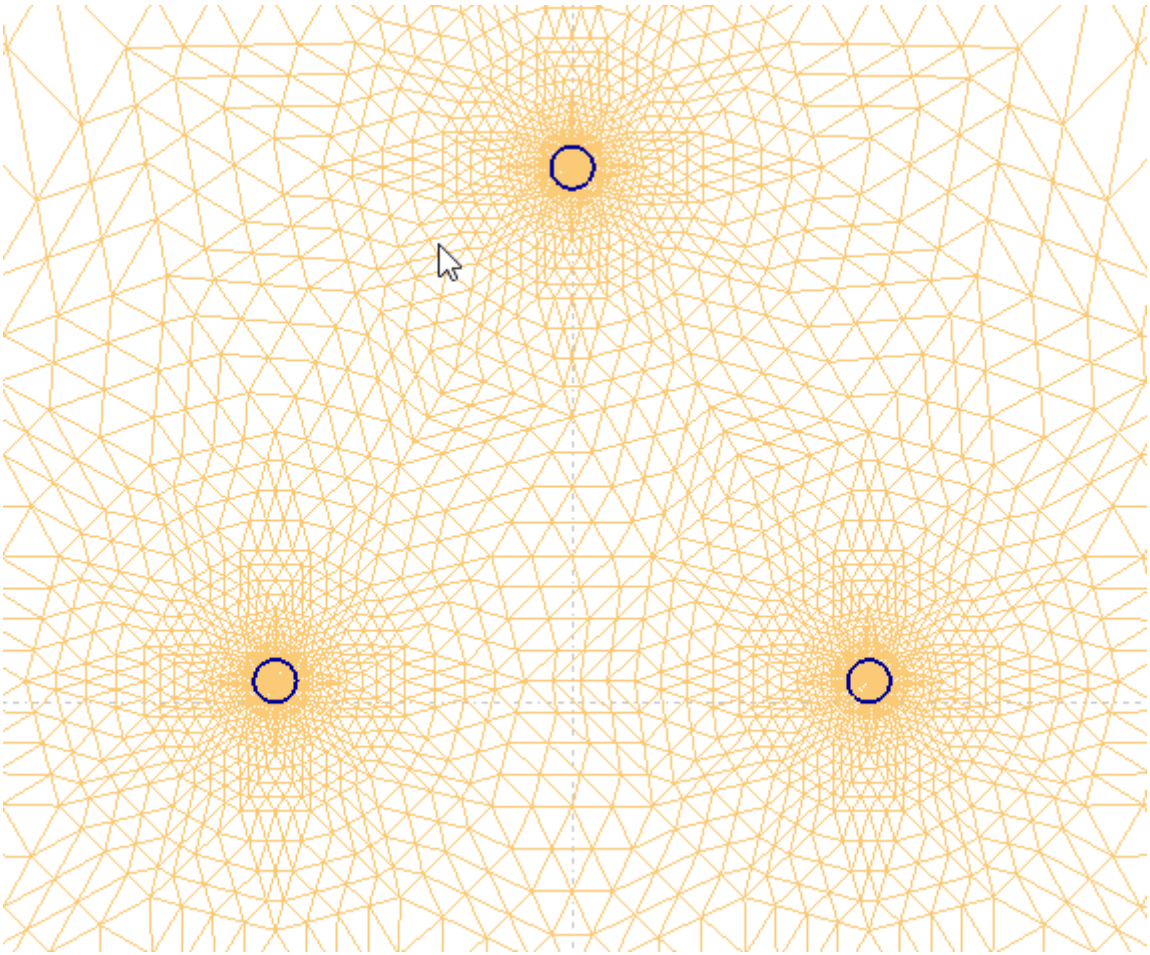
4.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků vznikla kvůli potřebě řešit složité úlohy z inženýrské praxe. Především byla vyvinuta na řešení úloh z pružnosti a strukturní analýzy. Počátky metody konečných prvků lze nalézt již v roce 1941 v práci Alexandera Hrennikoffa a Richarda Couranta v roce 1942. Metody, které použili, byly na první pohled odlišné, přesto se však shodovali v jednom bodě. Tím bodem bylo rozdělení spojité oblasti do oblasti množin samostatných podoblastí. Jedna z prací rozdělovala oblast pomocí mřížky, druhá práce rozdělovala oblast do konečného množství trojúhelníkových elementů. Vývoj metody konečných prvků začal v padesátých letech 20. století na univerzitě ve Stuttgartu prací Johna Argyrise a po něm pokračoval v 60. letech na univerzitě v Berkeley Ray W. Clough. Koncem šedesátých let se do této metody zapojila NASA, která vyvinula software NASTRAN, který pracuje na principu metody konečných prvků. [19]

Metoda konečných prvků je numerickou metodou sloužící k simulaci průběhu napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, proudění tekutin a pro tuto práci důležitou simulací jevů elektromagnetismu na vytvořeném fyzikálním modelu. Principem metody konečných prvků je diskretizace spojitého kontinua do určitého počtu prvků, kde zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Metoda konečných prvků je používána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického místa konstrukce. Principy metody jsou známy již delší dobu, její masové použití se rozmohlo až s nástupem výpočetní techniky. [19]

Princip metody je založen na řešení soustavy diferenciálních rovnic, které popisují vlastnosti určitého fyzikálního problému. Analytické řešení diferenciálních rovnic nepředstavuje problém dokud se jedná o základní fyzikální úlohy a jednoduché tvary geometrických těles. U složitějších analýz, jsou naopak charakteristické fyzikálně komplexní, matematicky diskontinuální soustavy u těles s mnohdy velmi složitou geometrií. Právě pro

řešení těchto problémů se ukázala jako nejvhodnější numerická aproximační metoda, která je právě onou metodou konečných prvků. Nejprve je nutné rozdělit geometricky definovaný objekt na konečný počet elementů, které vyplňují s dostatečnou přesností jeho tvar.



Obr. 4.1 Rozdělení oblasti na elementy

Jednotlivé elementy jsou vzájemně spojeny v místech zvaných uzel. Tyto uzly jsou matematické body, které mají známé souřadnice v prostoru a zjednodušeně lze říci, že jsou počítány hodnoty pro tyto body právě v těchto uzlech. Vlastnosti každého z elementů jsou popsány matematicky a popis celého objektu dostáváme soustavu rovnic. Řešení diferenciálních rovnic je poté převedeno na řešení algebraických rovnic, jejichž neznámé představují parametry požadovaného fyzikálního problému, který jsme se rozhodli řešit. Pro vyřešení vlastností celého objektu dostáváme soustavu s tisíci až miliony rovnic. [20]

4.2 Agros2D

Počítačový software Agros2D je univerzální multiplatformní aplikace, která nachází využití při počítání a řešení fyzikálních polí. Jazyk, kterým je daný program napsaný je C++. K řešení pomocí parciálních diferenciálních rovnic využívá knihovnu Hermes2D, která je založena na hp-FEM, což je adaptivní metoda konečných prvku s vyšším řádem přesnosti. Tato aplikace je vyvíjena Katedrou teoretické elektrotechniky na FEL ZČU v Plzni. Agros2D umožňuje řešit problémy elektrického, elektrického proudového, magnetického a teplotního pole v kartézském a osově symetrickém uspořádání. Program umí řešit ustálené stavy, harmonické analýzy a analýzy přechodových dějů. Samotný průběh modelování lze rozdělit na tři části.

- **Preprocesor**

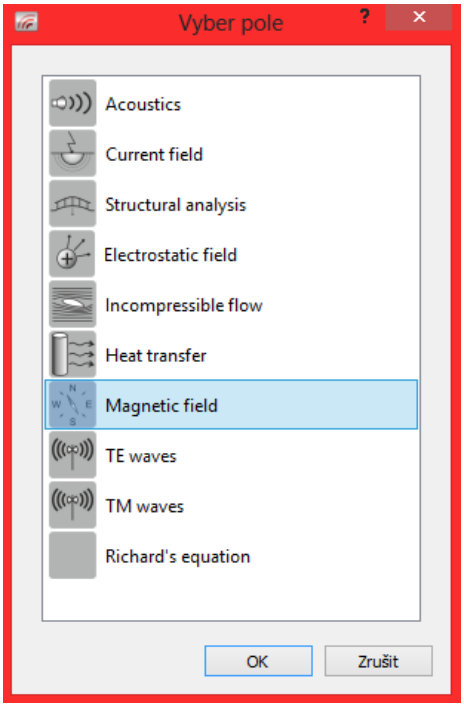
  V této části dochází k definici daného problému.
- **Procesor**

  Zde dochází k řešení vybraného fyzikálního pole.
- **Postprocesor**

  Postprocesor slouží k vyhodnocení výsledků a k analýze dat. [21]

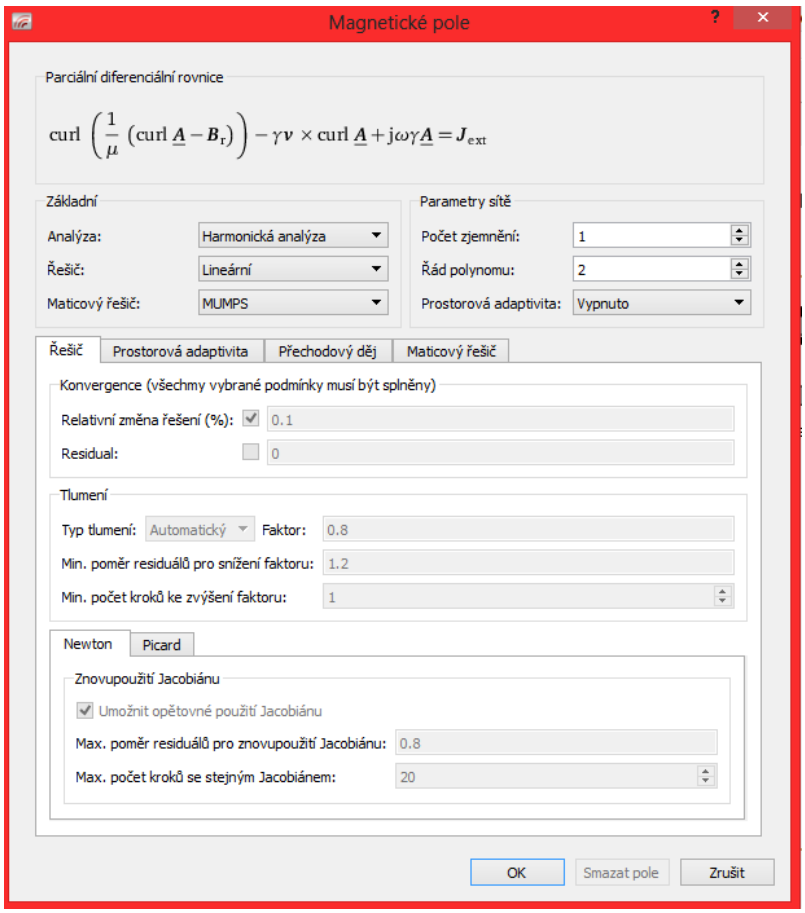
4.3 Postup při modelování

Při modelování magnetického pole postupujeme dle výše popsaných bodů. Nejprve v části zvané Preprocesor zvolíme druh fyzikálního pole. V tomto případě volíme pole magnetické – viz obrázek *4.2*.



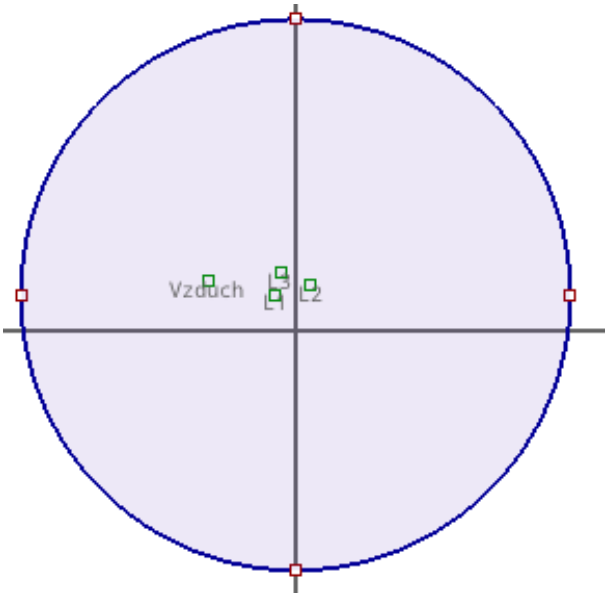
Obr. 4.2 Výběr fyzikálního pole

Po přidání fyzikálního pole si toto pole rozklikneme a vybereme typ analýzy. V našem případě se bude jednat o harmonickou analýzu, aby proudy, kterými jsou vodiče vedení napájeny, mohly být zadávány s fázovým posunem. Nastavení magnetického pole je k vidění na obrázku 4.3. Zároveň je zde možné vybrat typ sítě a její podrobné nastavení – například počet zjemnění a řád polynomu.



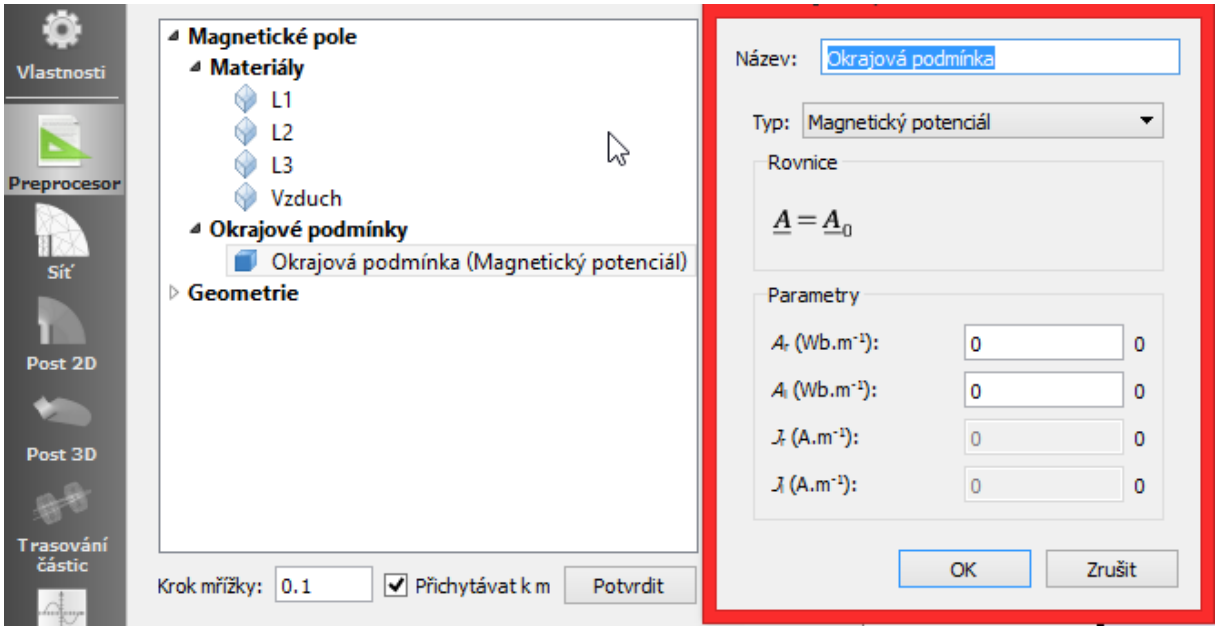
Obr. 4.3 Nastavení fyzikálního pole

V dalším kroku přichází na řadu již samotné modelování vybraného typu vedení – stožáru. Dle průřezu vedení jsem si určil jednotlivé rozměry, které jsem následně použil pro namodelování. Na obrázku 4.4 je vidět geometrie stožáru pro jednoduché vedení stožáru soudek.



Obr. 4.4 Geometrie stožáru soudek

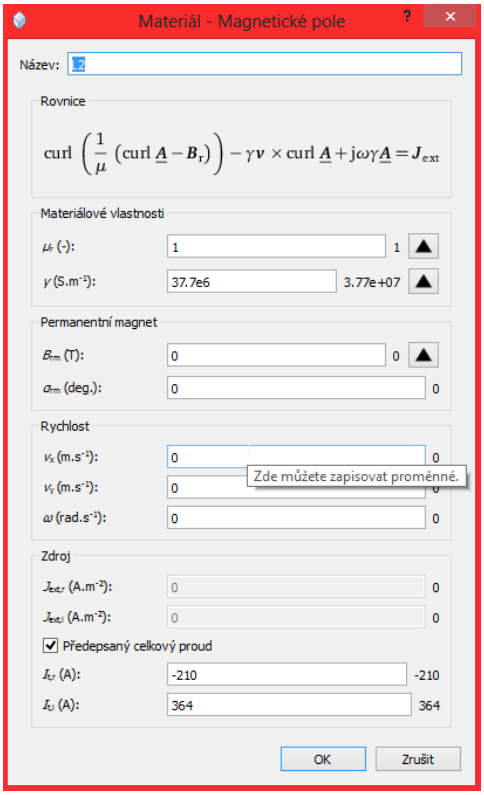
Po namodelování geometrie přichází na řadu volba typů elementů. Protože se jedná o 3-fázové vedení, každá fáze má svůj definovaný materiál. Dále se v modelu vyskytuje vzduchové okolí a celá oblast je uzavřena do oblasti, která má na svém okraji okrajovou podmínku. Touto podmínkou nastavíme úroveň magnetického potenciálu na okraji oblasti a přiřadíme mu hodnotu 0. Viz obrázek 4.5.



Obr. 4.5 Okrajová podmínka

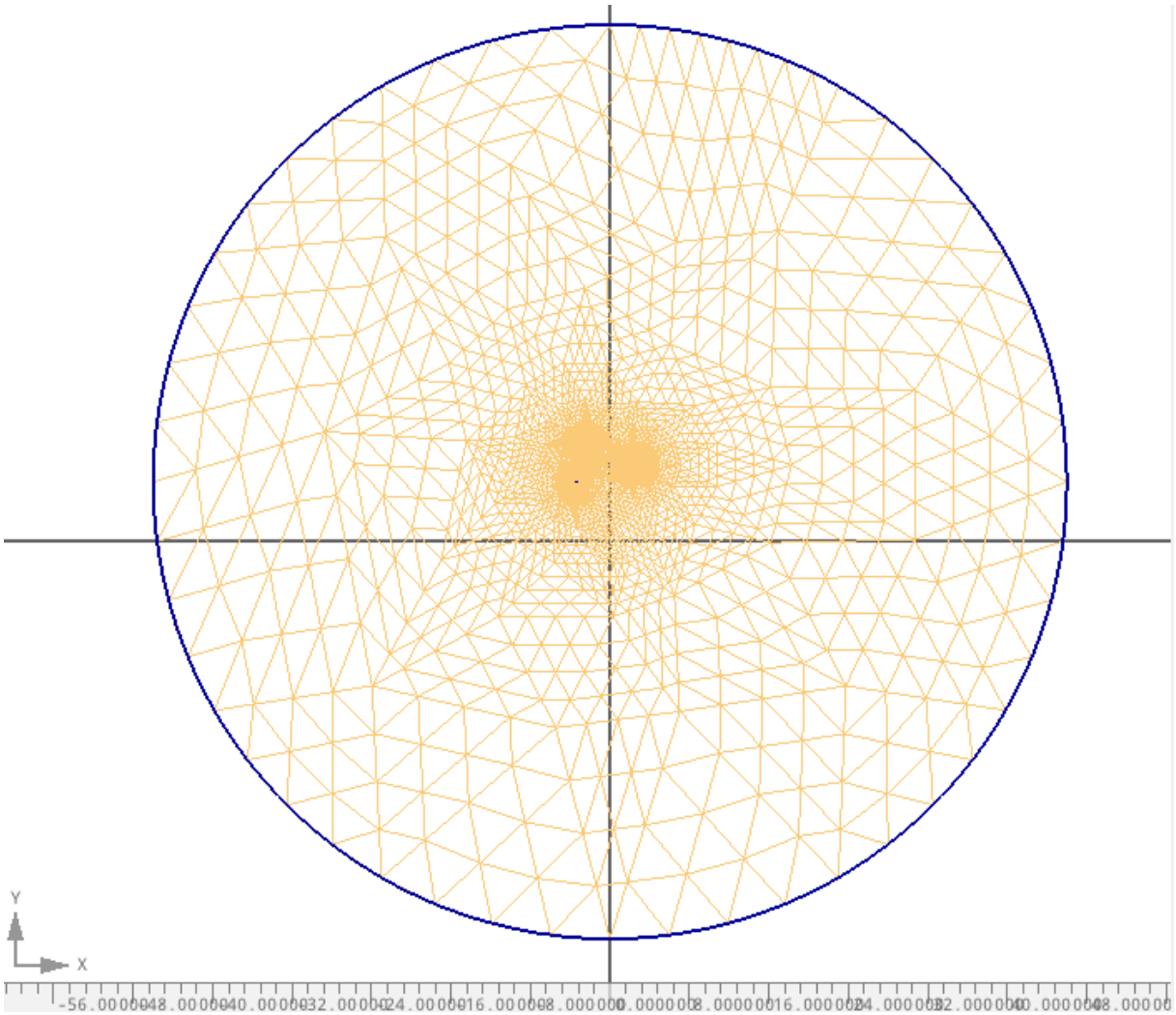
Následuje nastavení parametrů pro jednotlivé vodiče. Zde se zadává vodivost materiálu – použitý materiál pro modelování je hliník. Dále zde zadáváme předepsaný celkový proud, který protéká vodičem.

Na obrázku 4.6 je možné vidět, že vodič má předepsaný celkový proud pro reálnou složku a pro imaginární složku. Tím je možné docílit, že je proud natočen buď o 120°, nebo o -120°.



Obr. 4.6 Nastavení parametrů vodiče

Jakmile jsou všechny parametry nastaveny, celou oblast zasíťujeme. Tím se nám celý model rozloží do určitého počtu elementů, pro které jsou pomocí metody konečných prvků dopočítávány jednotlivé hodnoty. Zasíťovaný model je na obrázku 4.7.



Obr. 4.7 Zasíťovaný model

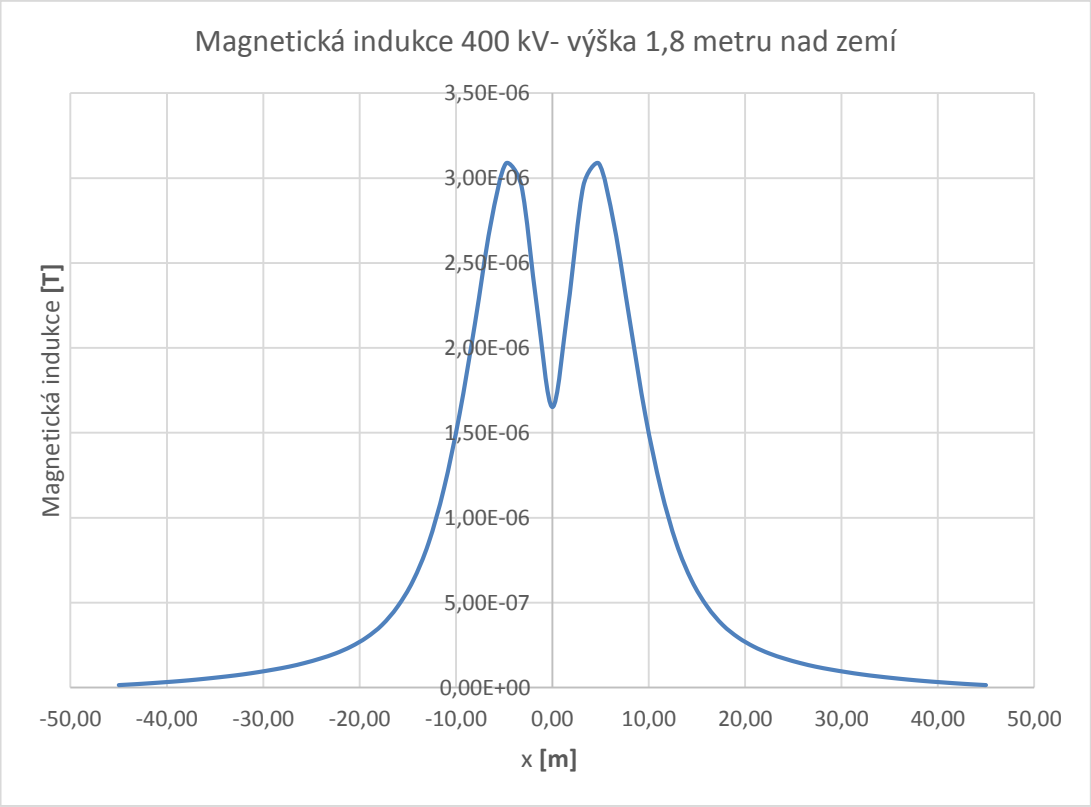
Po tomto kroku následuje již samotné řešení vybrané úlohy – část zvaná procesor a vyhodnocování namodelovaných výsledků v části zvané postprocesor. Samotné výsledky modelování jsou k vidění na následujících stranách.

5 Ilustrativní příklady

V této kapitole budou představeny výsledky modelování. Algoritmus základního výpočtu je obecný a lze jej aplikovat na jakékoli stožáry, typy vodičů a napěťové hladiny. Příklady, kde dochází ke křížení vodičů je nutné řešit odděleně a výsledné pole dopočítávat ze získaných hodnot pro určité typy vedení.

5.1 Magnetické pole vedení 400 kV

Magnetické pole pro hladinu napětí 400 kV je modelováno na stožáru Kočka (obrázek 2.7.). Podle zmiňovaného obrázku jsou vzdálenosti krajních vodičů od vodiče prostředního 11 m. Podle tabulky 2.4 je minimální vzdálenost vodičů 400 kV 8 metrů nad zemí a v této výšce se modelované vodiče budou nacházet. Hodnoty magnetického pole budou počítány pro výšku 1,8m nad zemí, aby se hodnoty daly porovnat s hodnotami, které uvádí norma. Vodiče, které jsem použil pro modelování, jsou tři trojsvazkové vodiče o průměru 450 mm^2, - též značené jako 3 x 3 450 AlFe 6. Dle tabulky 2.6 je maximální proud, který může protékat vodičem 775A. [22]

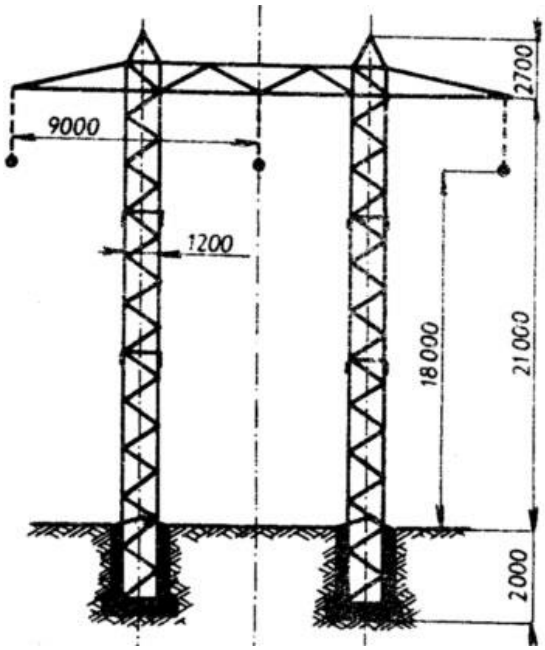


Obr. 5.1 Stožár Kočka – magnetické pole- vedení 400kV – 1,8 m nad zemí

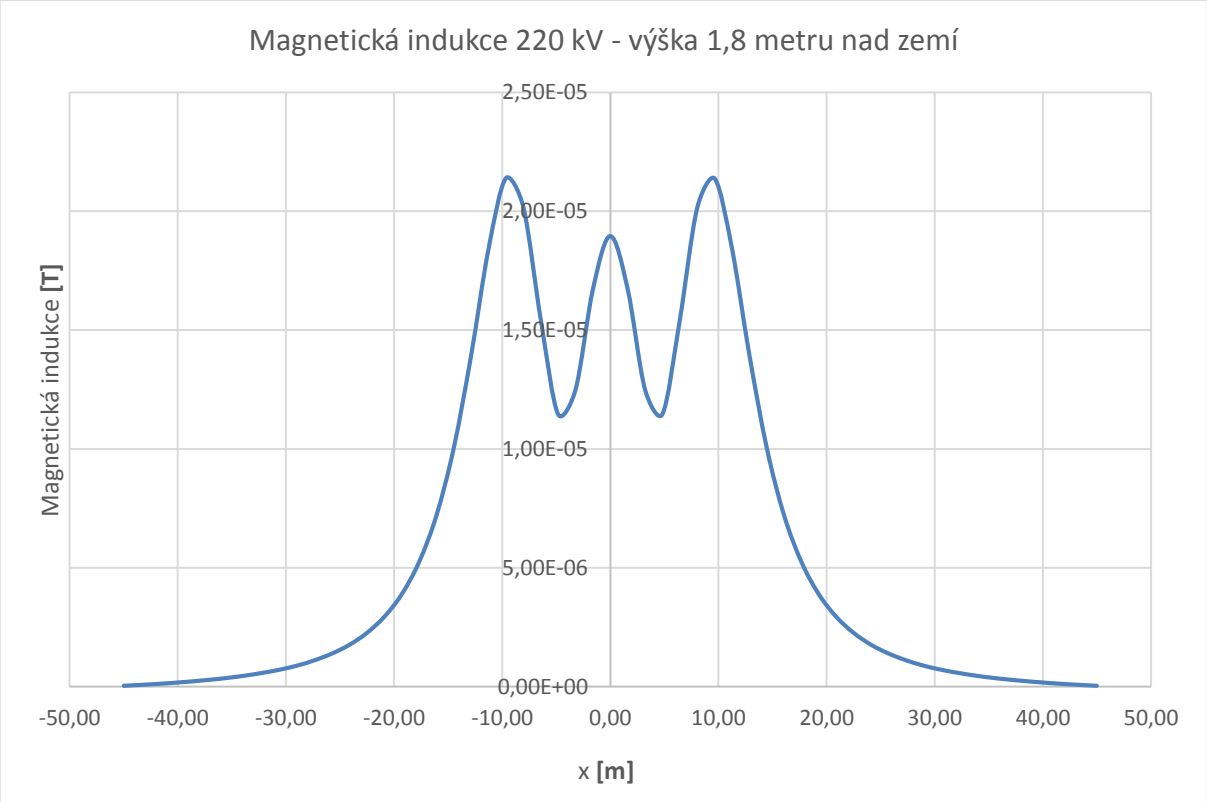
Modelovaný případ ukázal, že nedošlo k překročení limitních hodnot, které jsou uvedeny v předchozí kapitole.

5.2 Magnetické pole vedení 220 kV

Pro tuto napěťovou hladinu byl vybrán typ stožáru Portál - dle obrázku 5.2. Stožár bude osazen jednosvazkovými AlFe lany s označením 350 AlFe 6. Dle literatury [22] je pro tyto vodiče maximální povolený proud 660A a také pro tento proud je magnetické pole modelováno. Podle zmiňovaného obrázku jsou vzdálenosti mezi vodiči 9 metrů a z tabulky 2.4, která určuje minimální vzdálenost vodičů od země zjistíme, že tato vzdálenost je 7 metrů. Dle grafu ve spodní části stránky je vidět, že limity magnetické indukce ve výšce 1,8 m nad zemí nebyly překročeny.



Obr. 5.2 Stožár Portál, převzato z [12]



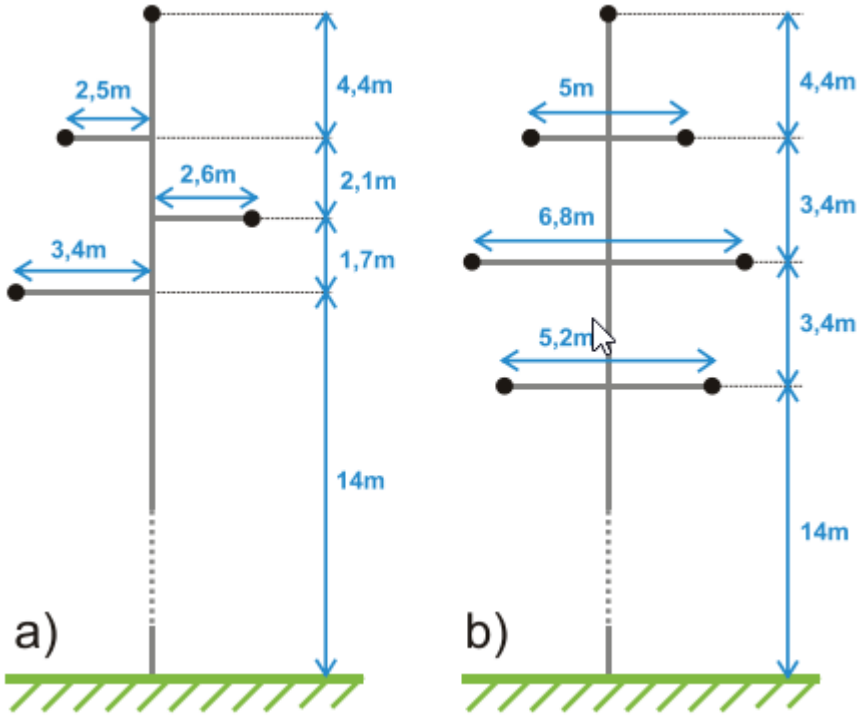
Obr.5.3 Stožár Portál – magnetické pole – vedení 220 kV – 1,8 m nad zemí

5.3 Magnetické pole vedení 110 kV

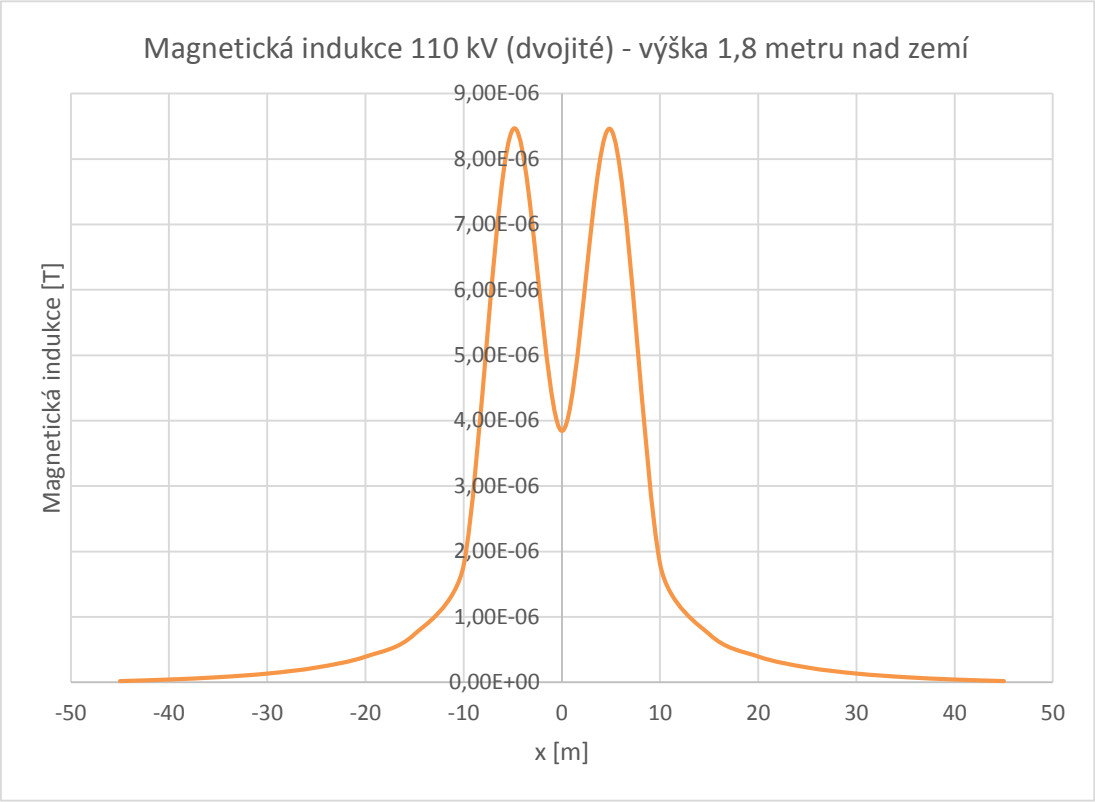
Pro tuto napěťovou hladinu byl vybrán typ stožáru pro jednoduchá vedení a stožár pro dvojité vedení - typ Soudek. Dle literatury [22] jsem pro stožár s jednoduchým vedením vybral lano 185 AlFe 6 a pro dvojité vedené jsem vybral 240 AlFe 6. Modelování bude opět provedeno pro nejnižší možnou výšku vodiče nad zemí, kde je výsledné elektrické a magnetické pole největší a tím je zde i nejvyšší šance, že dojde k překročení limitních hodnot. Tato hodnota je pro hladinu 110 kV 6 metrů nad zemí.

Vodiče jednoduchého vedení budou napájeny maximálním možným proudem, který stanovuje tabulka 2.6. Pro lano 185 AlFe 6 je tento proud 421A, pro vodič 240 AlFe 6 je to proud 490A.

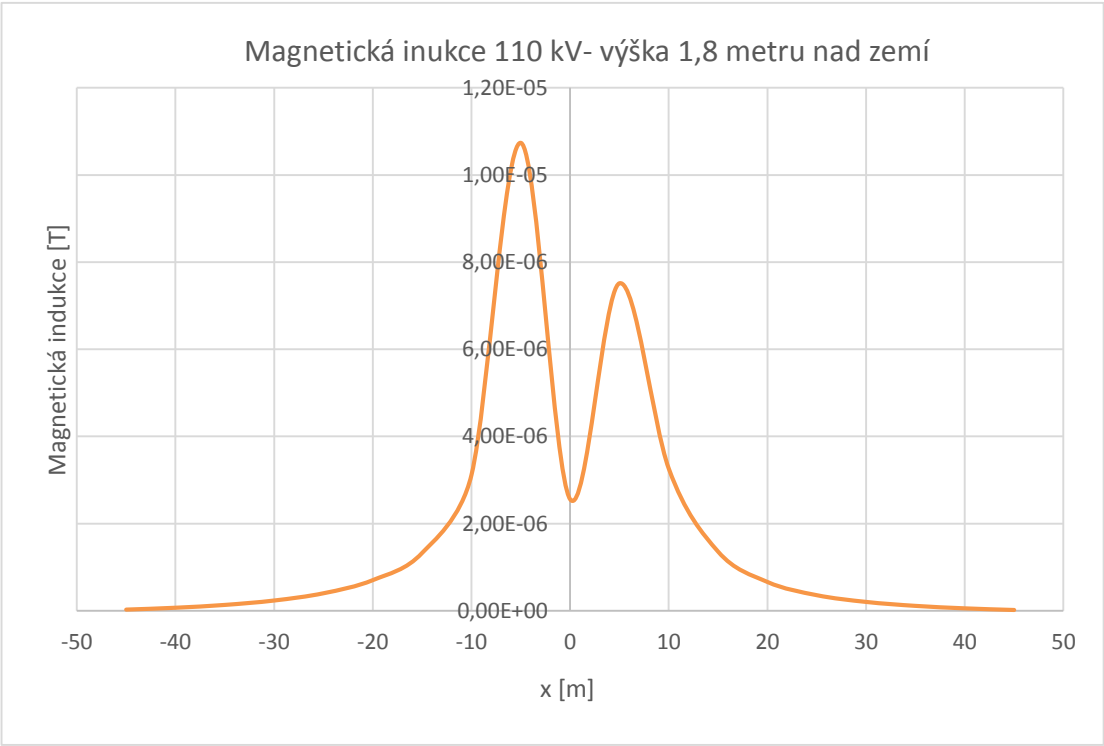
Z namodelovaných grafů lze opět vyčíst, že nedošlo k překročení limitních hodnot.



Obr. 5.4 Stožár 110kV pro jednoduché vedení a stožár soudek, převzato z[23]



Obr. 5.5 Stožár Soudek – magnetické pole – vedení 110 kV dvojité – 1,8 m nad zemí



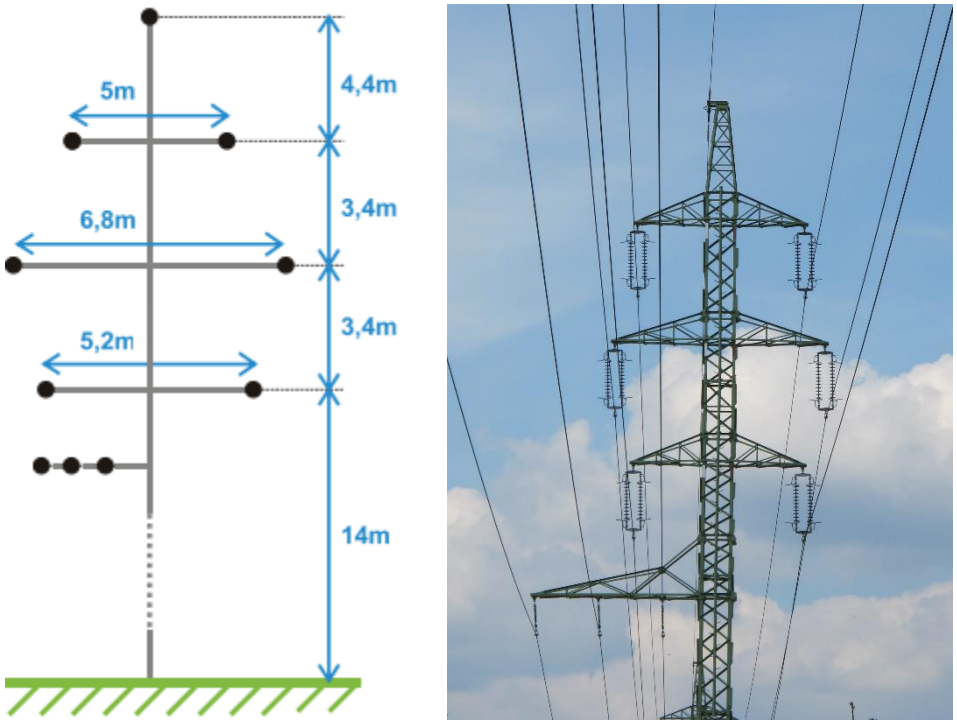
Obr. 5.6 Stožár pro jednoduché vedení – magnetické pole – vedení 110 kV – 1,8 m nad zemí

5.4 Magnetické pole při souběhu vedení

Při rozvodu elektrické energie se setkáváme i s případy, kdy dochází k souběhu dvou vedení. Pro tento případ jsem si vybral dva typy, kdy jednou budou vodiče umístěny na jedné konstrukci společně s vodiči vyššího napětí. Ve druhém případě jsem modeloval případ, kdy se sbíhají dva typy vedení.

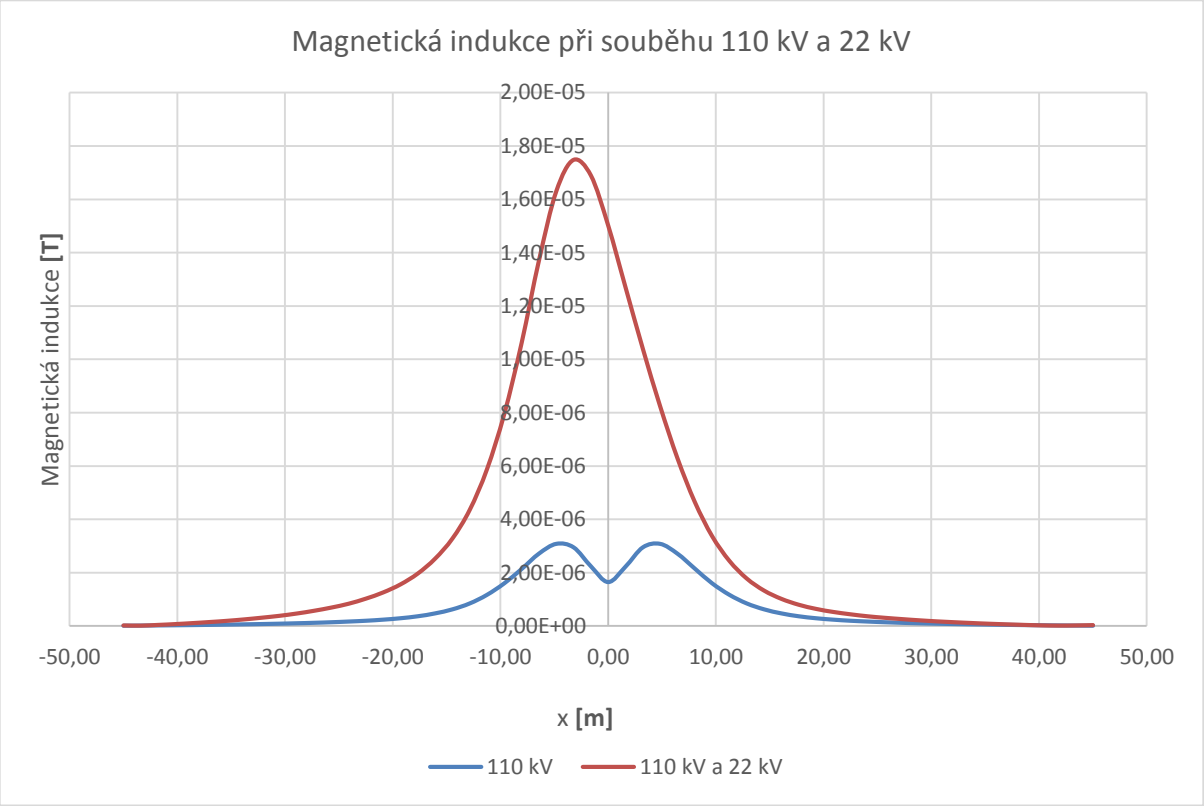
5.4.1 Souběh vedení 22 kV a 110 kV na jedné konstrukci

V tomto případě jsem modeloval reálnou situaci, kdy dochází k souběhu dvou typů vedení. Jedním typem vedení je soustava 110 kV, která je umístěna na stožáru typu Soudek, druhým typem je linka 22 kV, která je na stejném stožáru, ale umístěna v menší výšce. Fotografie a obrázek 5.7 ukazují rozmístění vodičů.



Obr. 5.7 Stožár Soudek pro 110 kV a zároveň 22 kV (Plzeň – Na Výsluní)

Vzdálenost vodičů 22kV od sebe je 150cm a vzdálenost vodičů 22 kV od vodičů 110 kV je 2 metry. Hodnoty jsou ověřeny dle tabulky 3.2 a ochranné pásmo vodičů 110 kV narušeno není. Linka 22 kV bude tvořena lanem AlFe 6 o průměru 95mm^2 a maximální dovolený proud těchto vodičů je 262 A. V grafu na následující stránce je vidět graf magnetické indukce v případě, kdyby byl stožár bez linky 22kV a v případě, který je na obrázku 5.7.

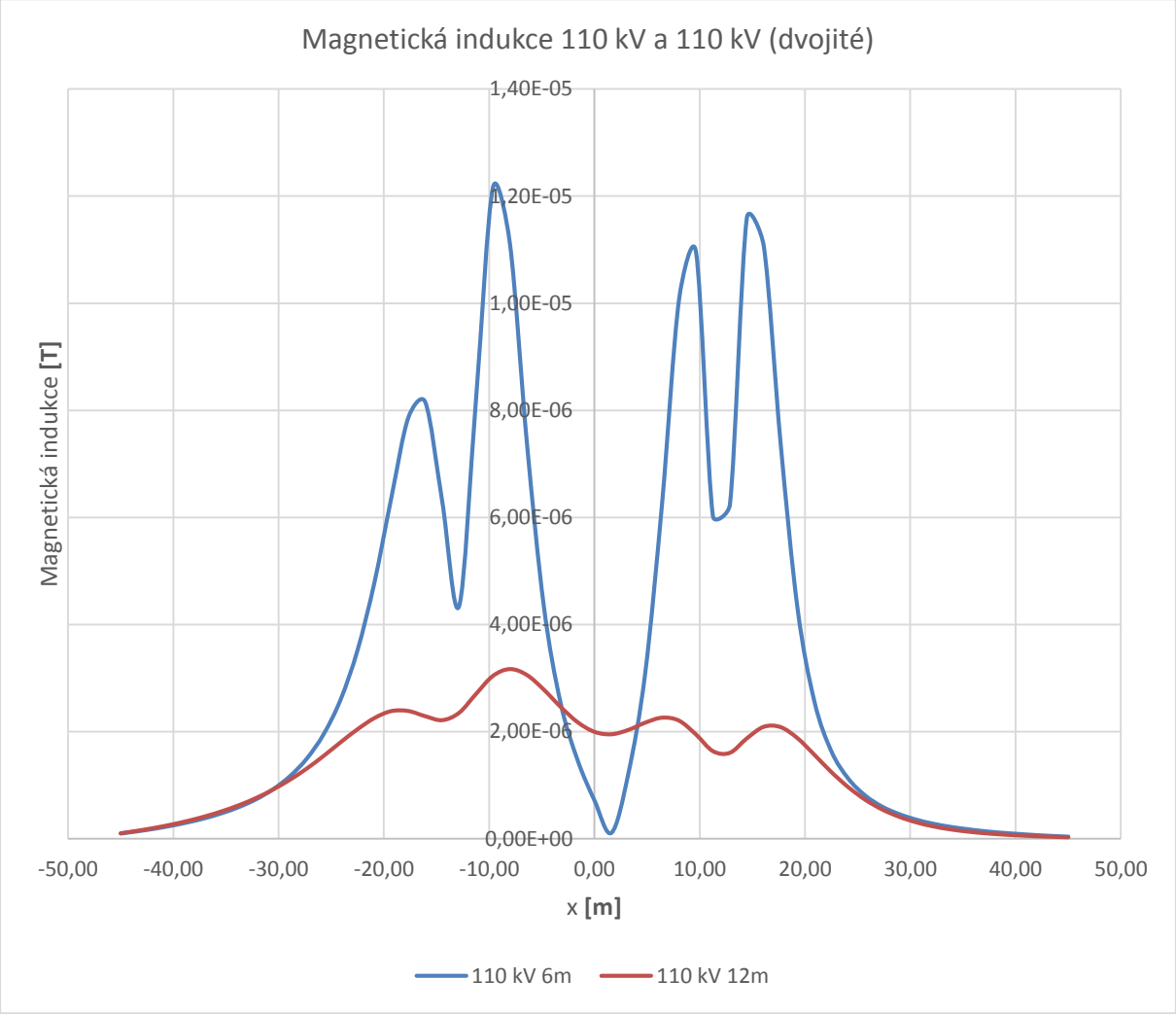


Obr. 5.8 Stožár Soudek – magnetické pole – vedení 110 kV (dvojité) a vedení 22 kV - 1,8 m nad zemí

5.4.2 Souběh vedení 110 kV a 110 kV

Druhá modelovaná situace souběhu vedení je opět k vidění v Plzni, tentokrát u Tyršova mostu. Nachází se zde jednoduché a dvojité vedení 110 kV, která se na své trase vyskytují vedle sebe. Vedení na fotografii vlevo je 110 kV jednoduché, vedení na fotce vpravo je dvojité. Pro modelování použiji parametry pro vodiče stejné jako při modelování jednotlivých vedení 110 kV a i stejnou geometrii stožárů. Vzdálenost mezi stožáry je 25 metrů, výška vodičů nad zemí (mostní konstrukcí) je 12 metrů. Na následující stránce je průběh magnetické indukce v místě, kde vodiče křižují mostní konstrukci (v rovině kolmé na vodiče).

Obr.5.9 Stožár Soudek 110 kV – Plzeň – Tyršův most



Obr. 5.10 Souběh vedení 110kV a 110kV (dvojité) – magnetická pole - výšku 1,8 m nad zemí

5.5 Magnetické pole pod křižováním vedení 110 kV, 220 kV a 400 kV

V tomto případě bude modelována situace, kdy dojde ke křížení vedení 110 kV, 220 kV a vedení 400 kV. Úhly mezi jednotlivými vedeními jsem zvolil 30°, 60°a 85°, zároveň zde provedu kombinaci různých typů stožárů a jejich vliv na samotné křížení.

Pravidla pro křížení vedení opět vycházejí z normy - Norma ČSN EN 50 341 – 1, kde je definována nejmenší přípustná vzdálenost De, která zamezuje přeskoku mezi jednotlivými vodiči. Vzdálenost De je uvedena v tabulce 5.1, která je zobrazena níže.

Tab. 5.1 Norma ČSN EN 50 341 – 1

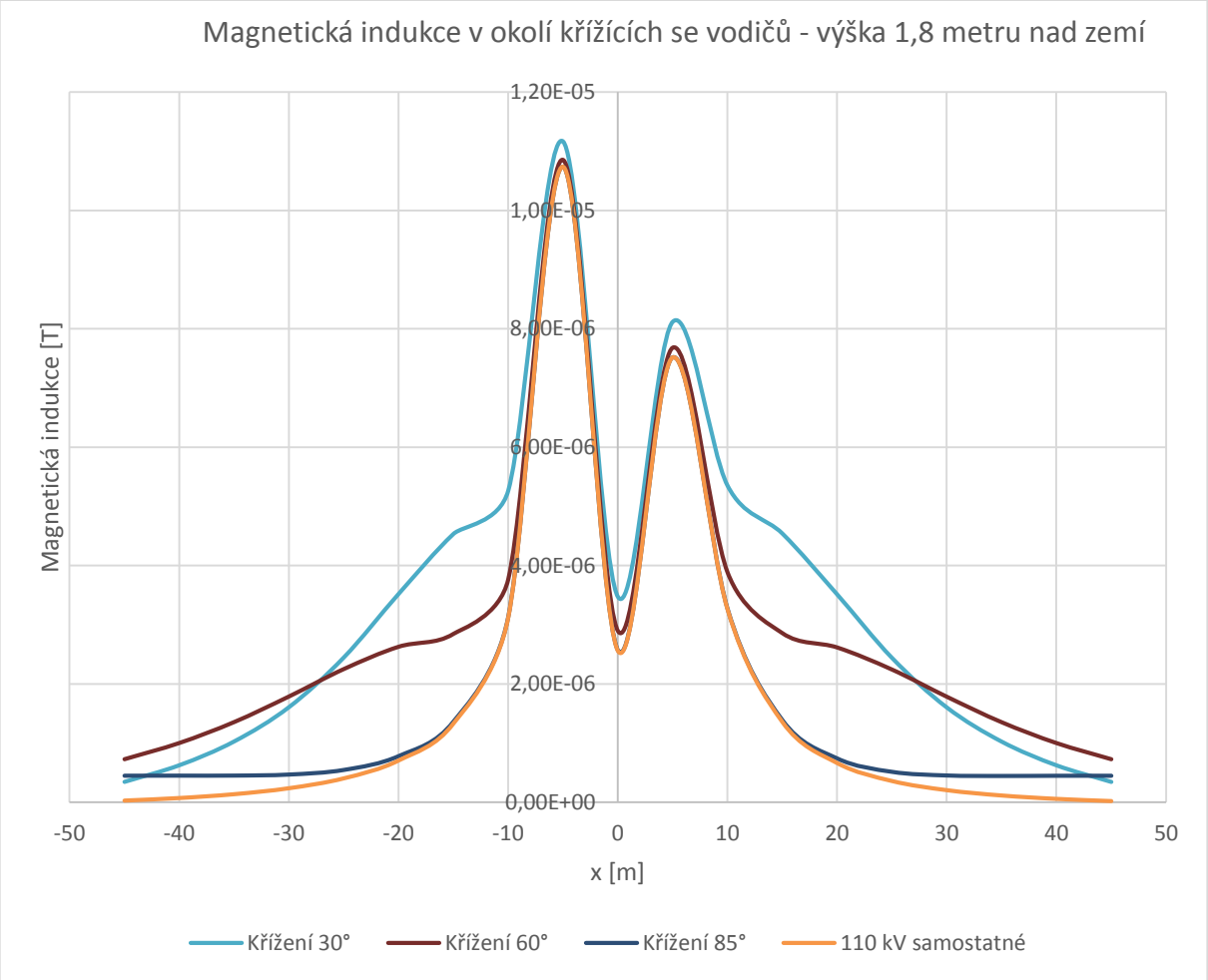
Napětí sítě [kV]	De [m]
123	1
245	1,7
420	2,8

Z tabulky vyplívá, že pokud chceme provést křížení dvou vedení elektrické energie, musíme dodržet nejmenší povolenou vzdálenost mezi vodiči. Po konzultaci problému s panem Ing. Jiřím Chlastákem z firmy Energon, který se zabývá projektováním a výstavbou distribučních vedení v sítích NN, VN a VVN, je tato vzdálenost opravdu minimální a v praxi se musí křižovatky vedení dělat s většími rozestupy. Záleží, v jaké námrazové oblasti se vodiče nacházejí na jejich teplotní roztažnosti a vlivu okolního prostředí. Pro modelování magnetického pole a jeho vlivu pod tímto křížením jsem vybral situaci, kdy vodiče nižší napěťové hladiny budou umístěny v jejich nejnižší možné výšce a vodiče z hladiny vyššího napětí budou umístěny ve vzdálenosti stanovené normou – ve vzdálenosti De od nejvyššího vodivého prvku nižší napěťové hladiny.

Hodnoty výsledné magnetické indukce budou počítány opět pro výšku 1,8 metru nad zemí, aby bylo možné získané výsledky porovnat s hygienickými limity, které jsou upraveny Nařízením vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.

5.5.1 Křížení vedení 110 kV a 220 kV

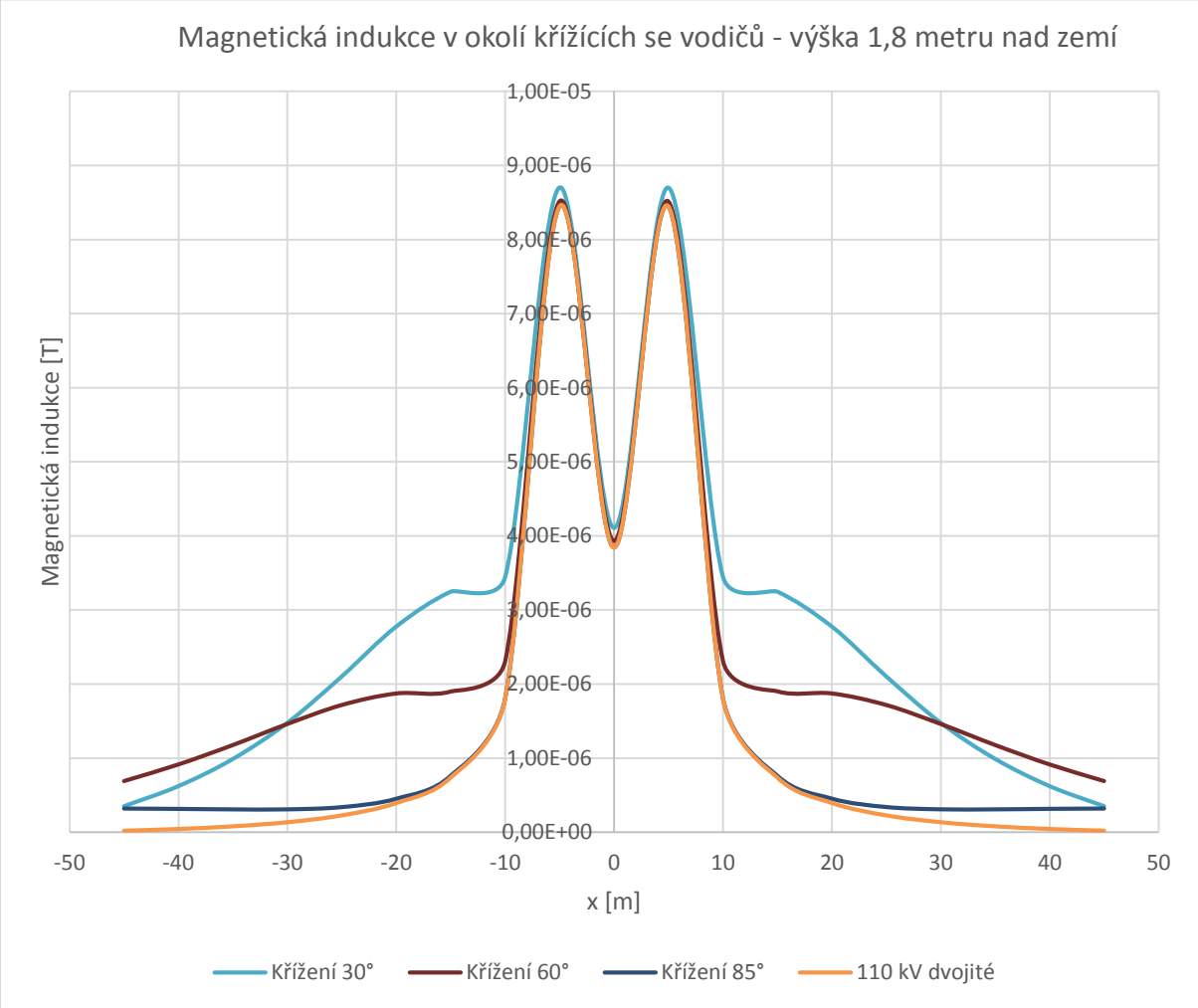
Křížení těchto vedení bude vycházet ze stožárů a modelů, které jsou uvedeny v úvodu kapitoly. Jako první případ jsem vybral křížení jednoduchého vedení 110 kV, které bude umístěno na stožáru pro napěťovou hladinu 110 kV. Hladinu 220 kV bude reprezentovat stožár portál, který bude osazen jednoduchými AlFe lany se stejnými parametry, jako v předchozí kapitole. Minimální vzdálenost vodičů 110 kV od země je 6 metrů, ve které vodiče budou umístěny. K této hodnotě je nutné připočítat vzdálenosti mezi vodiči na stožáru, která činí 3,8 metru a vzdálenost zemnícího lana od od nejvyššího fázového vodiče, který činí 4,4 m. Tím se dostáváme na výšku zemnícího lana, které je umístěno 14,2 metru nad zemí. Vodiče vyšší napěťové hladiny budou tedy při uvažování minimální vzdálenosti De, dle tabulky 1,7m, 15,9 metru nad zemí.



Obr. 5.11 Graf magnetické indukce v místě křížení vedení (110 kV jednoduché a 220 kV)

5.5.2 Křížení vedení 110 kV (dvojité) a 220 kV

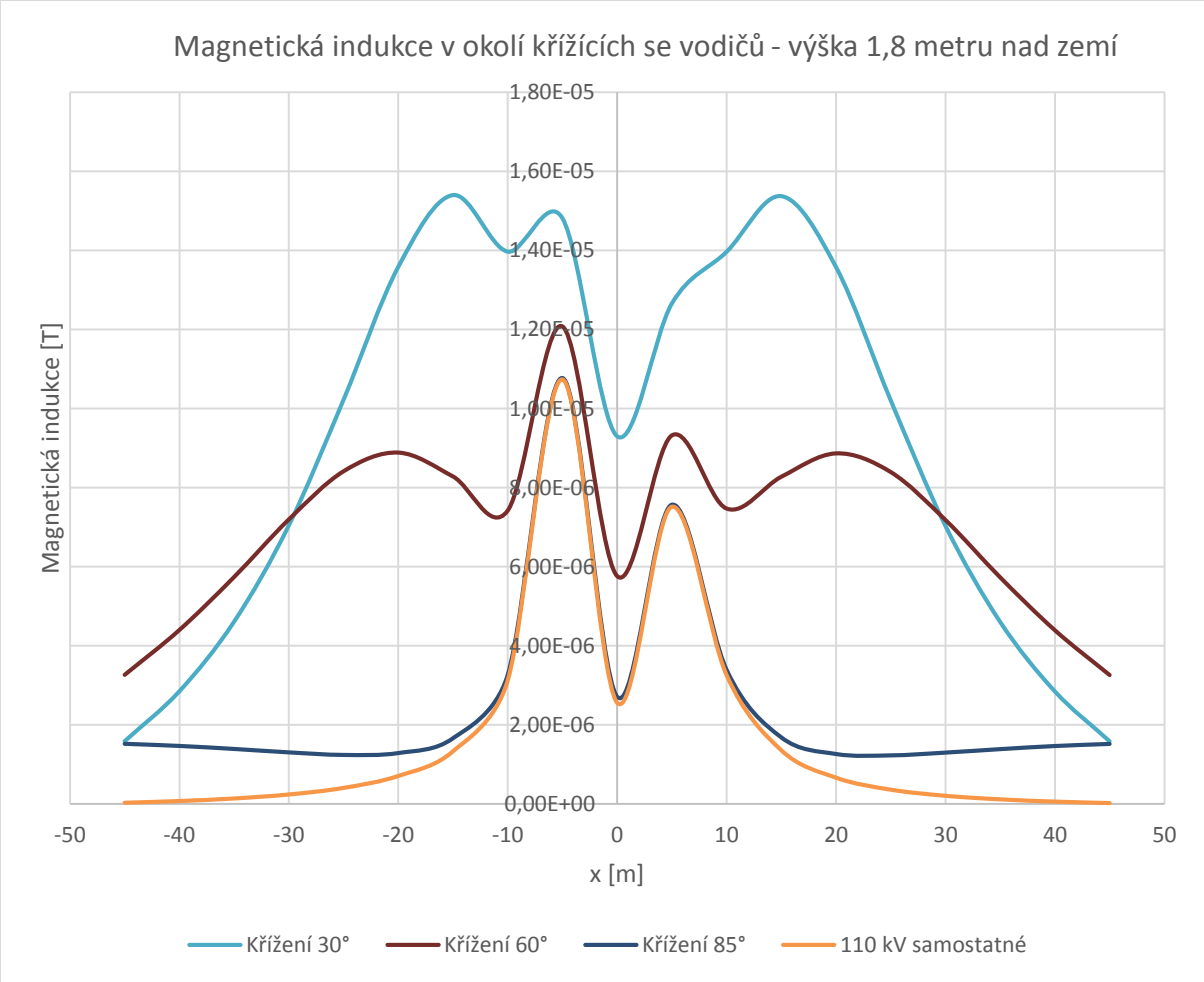
V druhém případě použijeme pro napěťovou hladinu 110 kV stožár soudek, osazen dvojitým vedením. Opět použijeme minimální vzdálenost vodičů od země, která je 6 metrů, vzdálenost mezi nejspodnějším fázovým vodičem a zemnícím lanem je 11,2 metru. Sečteme-li tyto vzdálenosti a přičteme minimální vzdálenost mezi vodiči, dostaneme minimální výšku vodičů pro napěťovou hladinu 220 kV, která je 18,9 metru.



Obr. 5.12 Graf magnetické indukce v místě křížení vedení (110 kV dvojité a 220 kV)

5.5.3 Křížení vedení 110 kV a 400 kV

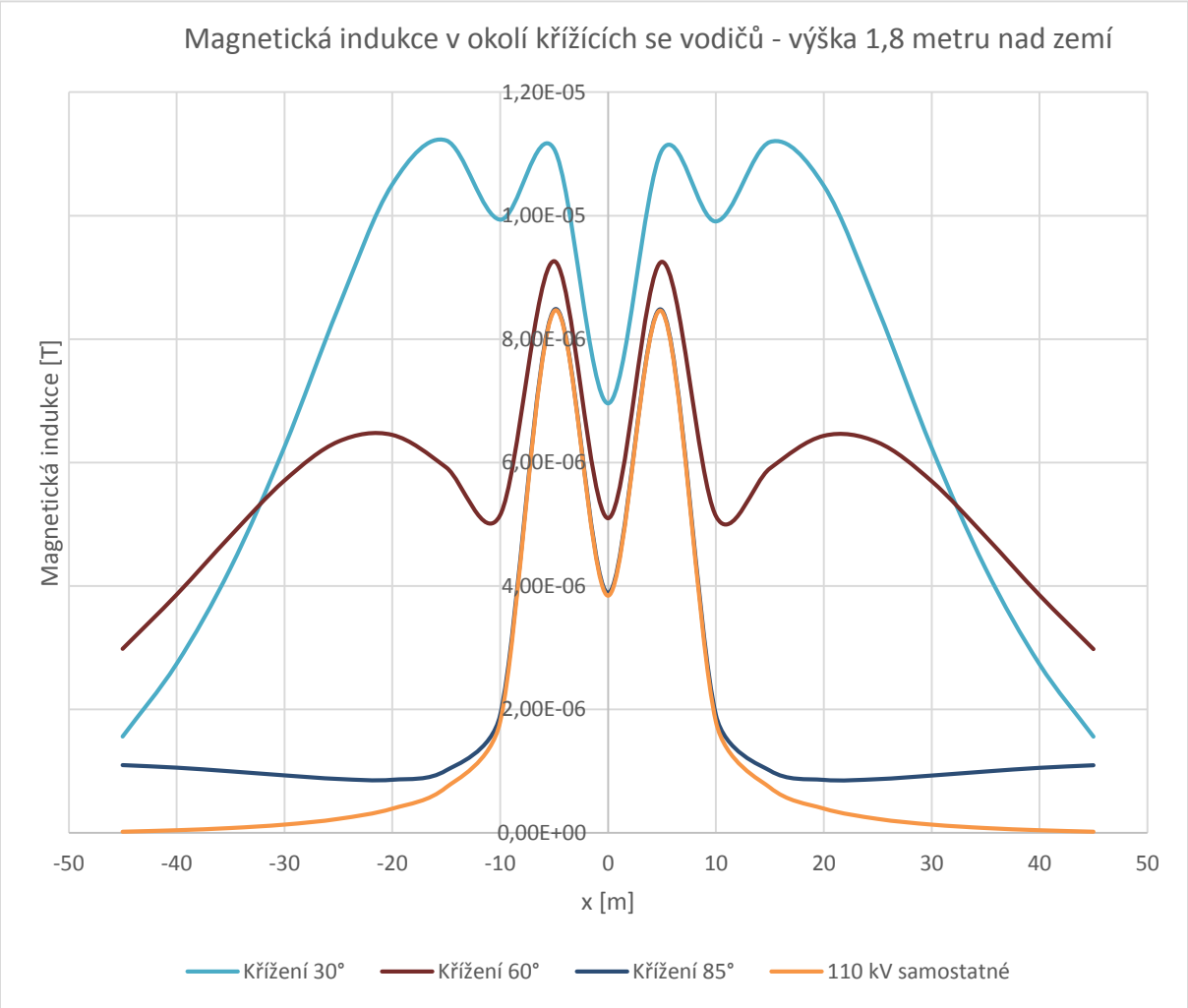
Stejným způsobem, jako v předchozím případě provedu výpočet i pro křížení vedení 110 kV a 400kV. 110 kV bude opět v nejnižší možné výšce, vedení, které bude 110 kV křižovat (400 kV) bude v 17 metrech nad zemí. Tato výška je dána konstrukcí stožáru 110 kV a připočtením nejmenší vzdálenosti mezi vodiči.



Obr. 5.13 Graf magnetické indukce v místě křížení vedení (110 kV a 400 kV)

5.5.4 Křížení vedení 110 kV (dvojité) a 400 kV

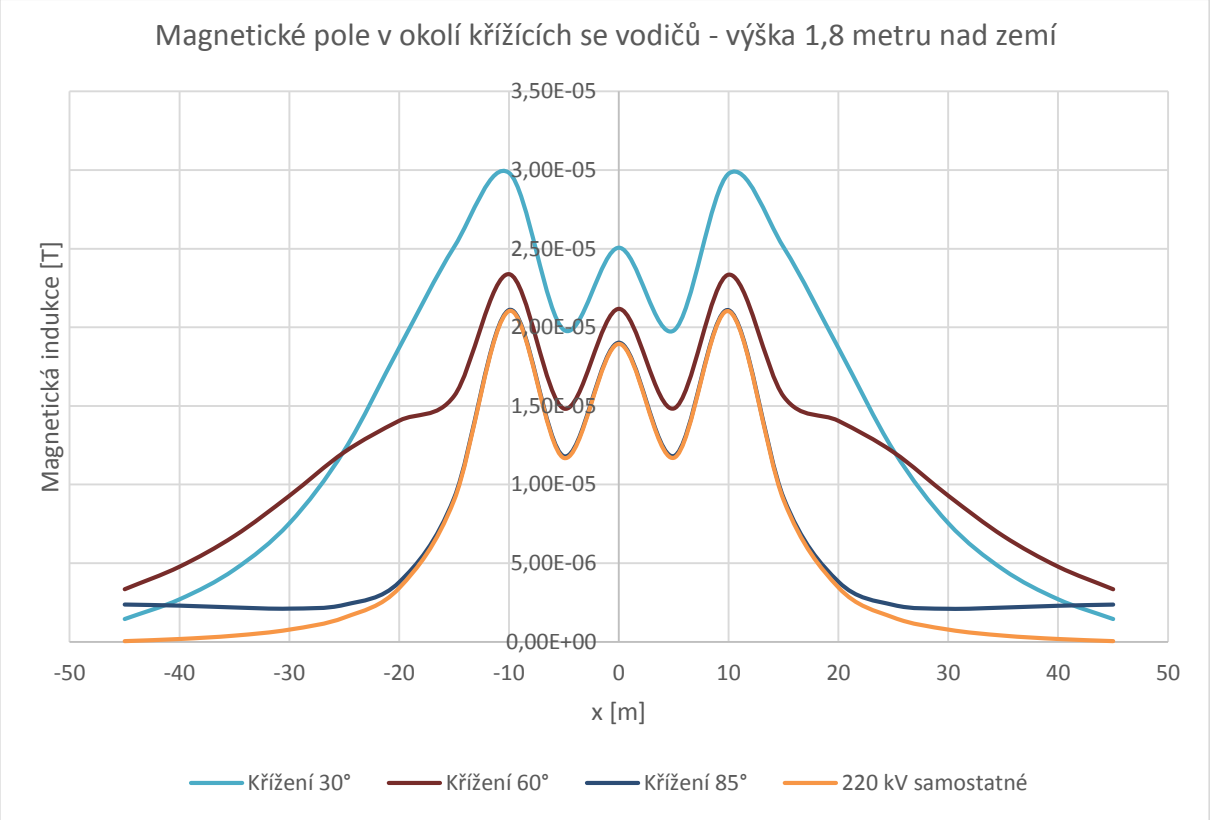
Pro toto křížení byla opět brána minimální výška vodičů nad zemí pro vedení 110 kV a vypočítána nejnižší možná výška vedení 400 kV. Vrchol zemnícího lana 110 kV je ve výšce 17,2 metry nad zemí, ochranné pásmo 400 kV je 2,8 metru. Po sečtení těchto hodnot získáme minimální výšku pro vodiče 400 kV, kterou je výška 20 metrů nad zemí.



Obr. 5.14 Graf magnetické indukce v místě křížení vedení (110 kV dvojité a 400 kV)

5.5.5 Křížení vedení 220 kV a 400 kV

Posledním případem křížení vodičů je křížení hladiny 220 kV, která je na stožáru Portál a vedení 400 kV, které je na stožáru kočka. Díky konstrukci stožáru 220 kV, kde vodiče jsou v jedné výšce nad zemí (7 metrů), dostaneme po připočtení výšky zemnících lan a ochranného pásma vedení 400 kV výšku vedení 400 kV. Tato výška je 13,3 metry. V praxi by k takové situaci pravděpodobně nedošlo, neboť vzdálenosti od země jsou opravdu ty nejnižší, jaké mohou být. I tak k překročení povolené výše magnetické indukce nedošlo.



Obr. 5.15 Graf magnetické indukce v místě křížení vedení (220 kV a 400 kV)

Velikost magnetické indukce byla počítána pouze pro její x-ovou složku, neboť y-nová složka magnetické indukce na člověka, který stojí pod vedením nepůsobí, jen ho protíná. V případě, kdy jsem y-novou složku uvažoval k překročení limitů také nedošlo, jen výsledná magnetická indukce byla nepatrně vyšší, než samotná x-ová složka.

Elektrické pole v Agrosu lze modelovat pouze pro ustálený stav a pro harmonický průběh je potřeba vypočítat průběh v různých časových okamžicích. Detailně bylo elektrické pole modelováno studenty z přechozích let ([25][26]). Výsledky elektrického pole pro různé stožáry proto uvádím jen v příloze na konci diplomové práce.

Závěr

Tímto závěrem bych rád zakončil a shrnul mou diplomovou práci. V úvodu práce jsem se zmínil o Maxwellových rovnicích a o způsobu, jakým se elektrické a magnetické pole počítá a modeluje. Ve druhé kapitole jsem se již přiblížil k samotnému vedení, kde jsem se pokusil vypsat nejdůležitější hodnoty, vzdálenosti, typy vedení a typy stožárů, které jsem následně používal pro samotné modelování. Ve třetí kapitole jsem se věnoval problematice elektromagnetické kompatibility elektrických a biologických systémů. Uvedl jsem zde možné způsoby a projevy elektromagnetického pole na přístroje, ale i způsoby, jakými se hodnoty získávají. Jednou z podkapitol byl i vliv elektromagnetického pole na živé organismy, kde jsem se snažil popsat druh působení na živé organismy a vliv samotného pole. Výsledkem bylo zhodnocení velikosti pole a jeho projevy v organismu. Dále jsem přešel k legislativní problematice, uvedl jsem maximální hodnoty magnetické indukce a velikosti elektrické intenzity, které jsou upraveny Nařízením vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením a částečně i normami.

Tím jsem přešel ke čtvrté a páte, pro mne nejzajímavější, kapitole, kde jsem se věnoval již samotnému modelování vybraných situací. Nejprve jsem představil samotný program, jenž jsem používal pro modelování, popsal metodu konečných prvků, která je programem využívána při numerickém řešení. Uvedl jsem zde i postup, jakým jsem používal pro získání výsledků.

Výsledkem diplomové práce jsou hodnoty magnetické indukce v okolí vedení 110 kV, 220 kV a 400 kV a jejich ověření a porovnání s maximálními hodnotami. Ve všech modelovaných situacích jsem počítal s nejnižšími výškami nad zemí, které teoreticky mohou nastat a s maximálními povolenými proudy, které dané vodiče mohou přenášet. Z výsledků modelování lze konstatovat, že při dodržení všech norem týkajících se výstavby vedení nedojde k překročení magnetické indukce v referenční výšce 1,8 metrů nad zemí.

V případě, kdy jsem křížil jednotlivá vedení, případně řešil jejich souběh, nenastala situace, kdy by došlo k překročení limitů. Došlo pouze ke změně průběhu magnetické indukce pod samotným vedením. Při malých úhlech křížení byl průběh magnetické indukce ovlivňován nejvíce, se zvětšujícím se úhlem mezi vedeními se magnetická indukce začala přibližovat k hodnotám základního vedení a při dosažení úhlu 90° bylo ověřeno, že se vodiče kolmé na sebe neovlivňují.

Seznam literatury

[1] SZANTÓ, Ladislav. *Maxwellovy rovnice*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2012, 123 s. ISBN 978-80-7300-450-7.

[2] RUSŇÁK, Karel. Elektromagnetické pole. [online]. 2005 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z:http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FYA2/elmg.pole.pdf

[3] HAŇKA, Ladislav. *Teorie elektromagnetického pole*. Praha: SNTL, 1975.

[4] MAREK, Vlastimil. Něco v síti: fejetony, které vycházely od roku 1997 na internetu na adrese http://svet.namodro.cz.*Http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/default.aspx* [online]. 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/default.aspx

[5] *ČEPS, a.s.: Údaje o PS* [online]. 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Udaje-o-PS.aspx

[6] *ČEPS, a.s.: Technické řešení přenosové soustavy* [online]. 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z:http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Technicke_reseniPS.aspx

[7] PROCHÁZKA, Radek. *Stožáry VVN (II): Stožáry dálkového vedení* [online]. 11.6.2007 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z:http://www.tzb-info.cz/4183-stozary-vvn-ii

[8] PROCHÁZKA, Radek. *Stožáry VVN (III): Konstrukční řešení stožárů* [online]. 18.6.2007 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z:http://www.tzb-info.cz/4192-stozary-vvn-iii

[9] ZASADIL, Pavel. *DUM pro seznámení se sítěmi NN – lana AlFe* [online]. 3.2013 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z:http://dumy.cz/stahnout/68545 [10] Elekéktrické stanice a vedení

[11] BAUMRUK, Jaroslav. *Ochrana před neionizujícím zářením* [online]. 2002 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z:http://www.bozpinfo.cz/priloha/neioniz.pdf

[12] JELÍNEK, Lukáš. *Hygiena Praha: Informace NLR* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z:http://www.hygpraha.cz/odbory.php?ksum=Mjg

[13] MERTLOVÁ, Jiřina a Martin KOCMICH. *Elektrické stanice a vedení*. Vyd. 2., upr. Plzeň: Západočeská univerzita, 1997, 161 s. ISBN 80-708-2356-9

[14] RAJZOVÁ, Jana. Problematika rušení od venkovních vedení a vysokonapěťových zařízení. Plzeň, 2009. Bakalářská práce. ZČU. Vedoucí práce Ing. Eva Müllerová, Ph.D.

[16] *Předpis č. 1/2008 Sb.: Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím*

zářením [online]. [cit. 2015-04-13].Dostupné z:http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2008-1

[17] ČSN 33 2040. *Elektrotechnické předpisy: OCHRANA PŘED ÚČINKY ELEKTRO-MAGNETICKÉHO POLE 50 Hz V PÁSMU VLIVU ZAŘÍZENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY*. Praha, 1993.

[18] ČSN EN 50 341-1. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45kV*. Praha, 2002.

[19] Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF

[20] KINDL, Vladimír. Modelování polí v elektrických strojích. [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=13491

[21] Agros2D - aplikace pro řešení fyzikálních polí. KARBAN, Pavel. [online]. 2010 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli

[22] *Učební texty: Parametry vedení a transformátorů - dimenzování*. Vysoká škola báňská. Dostupné z: fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni.../parametry.doc

[23] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSAGOVÁ, Martin PAAR a Daviv TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav* [online]. Praha, 2011 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf

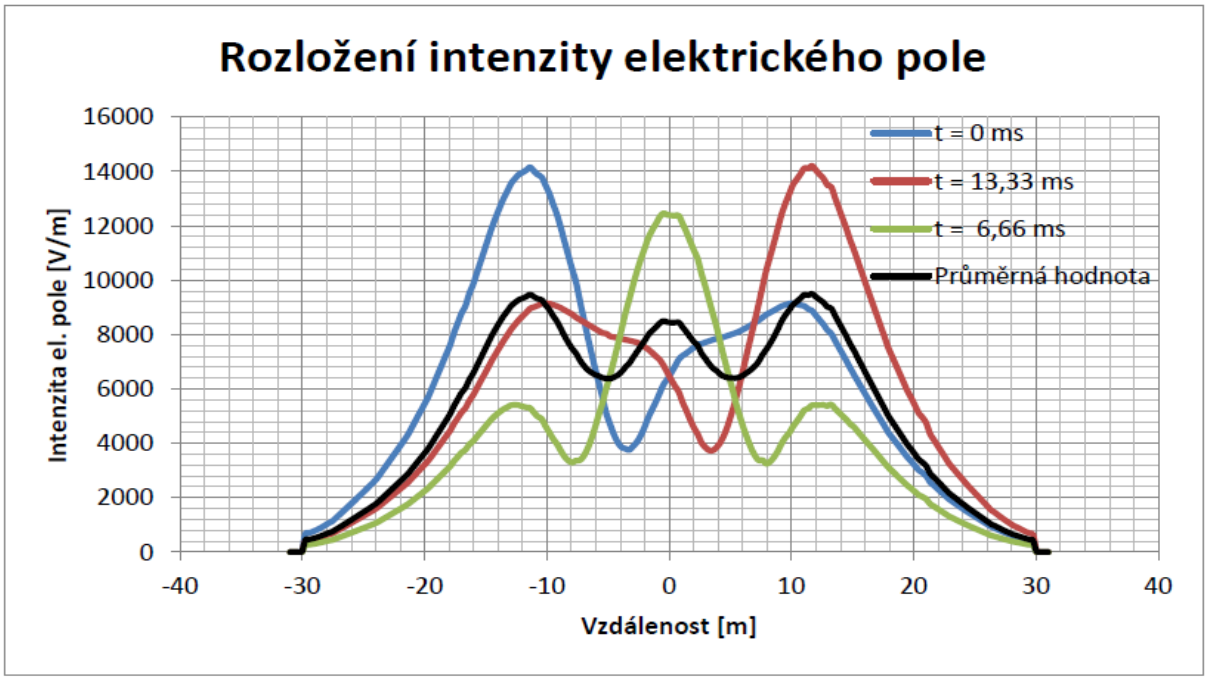
[24] IVÁNEK, Lubomír. *Elektromagnetismus* [online]. Ostrava: VŠB -TUO, 2007 [cit.2015-03-23]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/EMag/Elektromagnetismus.pdf

[25] ČESKÝ, Josef. 2012. *Vliv elektromagnetického pole venkovních vedení na okolní prostředí*. Plzeň. Bakalářská práce. FEL - ZČU.

[26] NAZARČÍK, Tomáš. 2012. *Vyšetření elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení*. Plzeň. Bakalářská práce. FEL - ZČU.

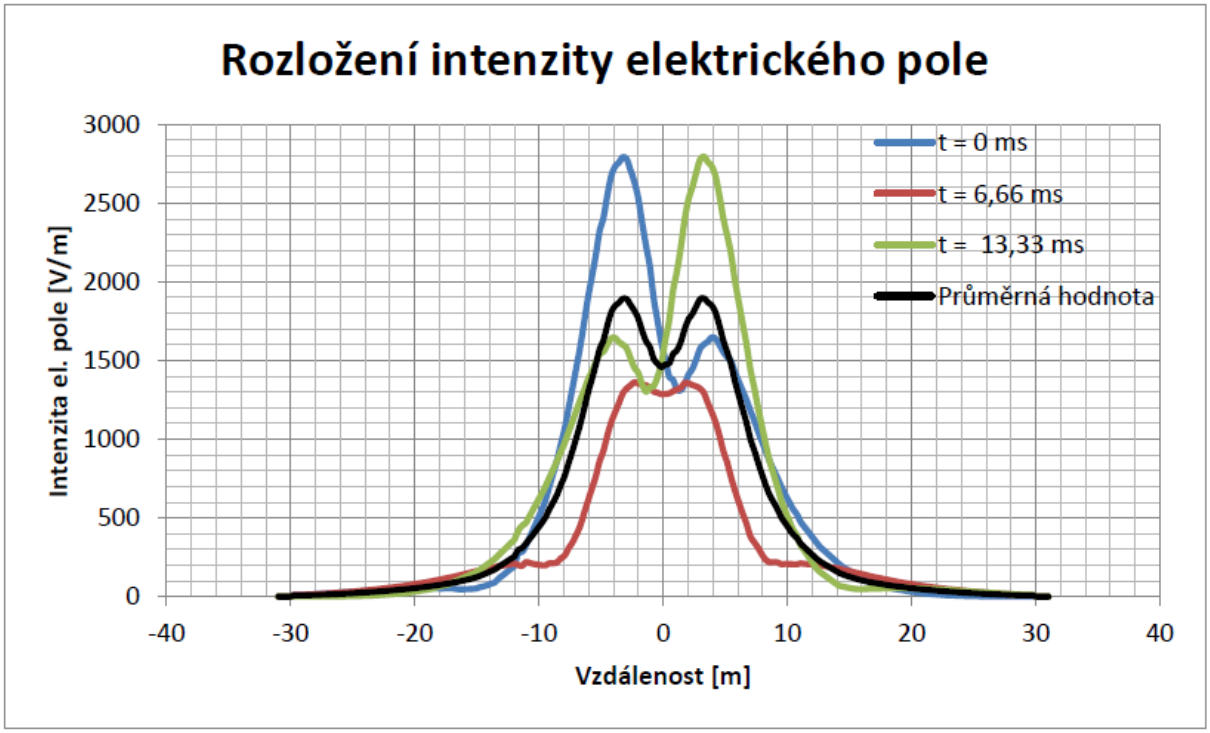
Přílohy

- Elektrické pole pro 400 kV v minimální výšce nad zemí – stožár Kočka – hodnoty pro *intenzitu elektrického pole byly překročeny.*



Obr. 1. Graf intenzity elektrického pole – 400 kV, převzato z [25]

- Elektrické pole 110 kV v minimální výšce nad zemí – stožár Soudek – hodnoty pro intenzitu elektrického pole nebyly překročeny.



Obr. 2. Graf intenzity elektrického pole – 110 kV, převzato z [25]