

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv elektromagnetického pole venkovních vedení na
okolní prostředí**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef ČESKÝ**
Osobní číslo: **E09B0038P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Vliv elektromagnetického pole venkovních vedení na okolní prostředí**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte teorii k danému tématu a uveďte stav řešené problematiky, zjistěte nejvyšší přípustné a doporučené hodnoty příslušných veličin.
2. Vyšetřete rozložení intenzity elektrického pole a magnetické indukce v okolí venkovních vedení.
3. Konkrétní výpočty provádějte pro různé stožáry a různé typy vodičů.
4. Uveďte možnosti potlačení vlivu elektrického a magnetického pole venkovních vedení.



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. Mayer, D., Ulrych, B.: Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí, Praha, SNTL, 1988.

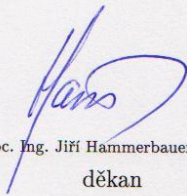
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lenka Šroubová

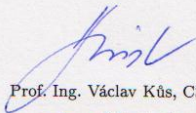
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 17. října 2011

Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2012


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Hlavním cílem mojí bakalářské práce je zjištění vlivu elektromagnetického pole venkovních vedení na okolní prostředí. Jsou zde uvedeny nejvyšší přípustné hodnoty elektrické intenzity a magnetické indukce. V této práci se zabývám elektromagnetickým polem pod vedením (110 kV, 400 kV). Teoretické výsledky byly porovnány s reálným měřením indukovaného proudu pod vedením 400 kV.

Klíčová slova

Elektromagnetické pole, intenzita elektrického pole, magnetická indukce, indukovaný proud, elektrické vedení, elektromagnetická kompatibilita, hygienické limity.

Abstract

The main theme of my BA thesis is to determine the effect of the electromagnetic field of transmission wiring on the surrounding environment. Here are listed the highest acceptable value of electric intensity and flux density. The thesis deals with the electromagnetic field under the transmission wiring (110 kV, 400 kV). Theoretical results were compared with the objective measurement of the induced current under the transmission wiring of 400 kV.

Key words

Electromagnetic field, electric field intensity, flux density, induced current, transmission wiring, electromagnetic kompatibility, hygiene limits.

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu použité literatury. Veškerý software použitý při vypracování bakalářské práce je legální a byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni dne 6.6.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Děkuji paní Ing. Lence Šroubové za konzultace a cenné rady při vypracování této práce. Samozřejmě také děkuji rodině za podporu během studia a za asistenci při měřeních.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 VENKOVNÍ VEDENÍ	11
1.1 STOŽÁRY	11
1.2 PŘENOSOVÉ TROJFÁZOVÉ SOUSTAVY	11
1.3 PARAMETRY VODIČŮ	12
1.4 VÝSTAVBA NOVÉHO VEDENÍ	13
2 VLIV ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE NA LIDSKÝ ORGANISMUS	14
2.1 SROVNÁNÍ PŘÍRODNÍCH POLÍ S POLÍ POD VEDENÍM	14
2.2 ELEKTROMAGNETICKÁ POLE V BĚŽNÉM ŽIVOTĚ	14
2.3 PŮSOBENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE NA LIDSKÝ ORGANISMUS	14
2.4 HYGIENICKÉ LIMITY PRO ELEKTROMAGNETICKÉ POLE	15
2.4.1 <i>Ochrana před účinky elektromagnetického pole 50 Hz (ČSN 33 2040)</i>	15
2.4.2 <i>Nariadení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením (č. 1/2008 Sb.)</i>	16
2.5 VÝZKUMNÝ PROJEKT SVĚTOVÉ ZDRAVOTNICKÉ ORGANIZACE	17
3 VLIV ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE NA ELEKTRICKÁ ZAŘÍZENÍ	21
3.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)	21
3.2 RUŠENÍ	21
3.2.1 <i>Přijímače rušení</i>	21
3.2.2 <i>Vazební okruhy (cesty) rušení</i>	22
3.2.3 <i>Rušení od venkovních vedení</i>	23
4 ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO A MAGNETICKÉHO POLE VEDENÍ	25
4.1 MODELOVÁNÍ ELEKTRICKÝCH A MAGNETICKÝCH POLÍ V PROGRAMU AGROS2D	25
4.2 MATEMATICKÝ MODEL	25
4.3 ELEKTRICKÉ A MAGNETICKÉ POLE VEDENÍ 400 kV	27
4.4 ELEKTRICKÉ A MAGNETICKÉ POLE VEDENÍ 110 kV	29
5 MOŽNOSTI POTLAČENÍ VLIVU ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	31
5.1 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE V BUDOVÁCH	31
5.2 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE V OKOLÍ VENKOVNÍCH VEDENÍ	31
5.2.1 <i>Omezení vlivu kapacitní a induktivní vazby</i>	31
5.2.2 <i>Omezení vlivu elektromagnetického záření</i>	32
6 REÁLNÁ MĚŘENÍ	33
6.1 MĚŘENÍ Č. 1	33
6.1.1 <i>Měření napětí</i>	33
6.1.2 <i>Měření proudu</i>	34
6.2 MĚŘENÍ Č. 2	35
6.3 MĚŘENÍ Č. 3	35
6.4 MĚŘENÍ Č. 4	36
7 ZÁVĚR	38
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	39
PŘÍLOHY	1

Úvod

Cílem této bakalářské práce je posouzení vlivu elektromagnetického pole venkovních vedení na okolí prostředí. Především jsem popsal vliv na člověka a rušení elektrických zařízení.

V práci je uvedeno základní rozdělení stožárů. Zabývám se i parametry vodičů na jednotlivých napěťových hladinách a výstavbou nového vedení. Elektromagnetická pole vedení jsou zde porovnávána s poli přírodními a je popsáno působení těchto polí na lidský organismus a s tím související platné limity pro elektromagnetické pole. Z těchto limitů jsou v práci uvedeny hodnoty magnetické indukce, elektrické intenzity a modifikované proudové hustoty. Předkládám výsledky výzkumného projektu Světové zdravotnické organizace ohledně souvislosti mezi těmito účinky a závažnými onemocněními jako je rakovina, Parkinsonova nebo Alzheimerova choroba. V práci řeším i vliv elektromagnetického pole na elektrická zařízení a elektromagnetickou kompatibilitu, která je spojena s rušením přenosových a informačních systémů. Nalezneme zde rozložení elektrického a magnetického pole vedení 110 kV se stožáry typu „soudek“ a vedení 400 kV se stožáry typu „kočka“. Zmíním se také o možnostech omezení vlivu těchto polí, zmenšení vlivu kapacitní a induktivní vazby a zmírnění vlivu elektromagnetického záření. V neposlední řadě se pokusím na vlastní kůži ověřit účinky indukovaného proudu, zjistím jeho rozložení pod vedením 400 kV a porovnáím ho s vypočtenou intenzitou elektrického pole.

Seznam symbolů a zkratk

A-metr.....	ampérmetr
EMC.....	elektromagnetická kompatibilita
IARC.....	Mezinárodní agentura pro boj s rakovinou (International Agency for Research on Cancer)
ICNIRP.....	Mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
V-metr.....	voltmetr
vf.....	vysokofrekvenční
vn.....	vysoké napětí
WHO.....	Světová zdravotnická organizace (World Health Organization)
A	magnetický vektorový potenciál [$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$]
B	magnetická indukce [T]
C	kapacita [F]
D	elektrická indukce [$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$]
E	intenzita elektrického pole [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]
H	intenzita magnetického pole [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]
I	proud [A]
J_{ext}	vnější proudová hustota [$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$]
J_{mod}	nejvyšší přípustná hodnota modifikované proudové hustoty [$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$]
P	výkon [W]
R_v	odpor voltmetru [Ω]
t	čas [s]
U	napětí [V]
X_c	kapacitní reaktance [Ω]
μ	permeabilita [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$]
μ_r	relativní permeabilita [-]
γ	konduktivita [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$]
ω	úhlový kmitočet [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

1 Venkovní vedení

Elektrická vedení jsou zařízení, která slouží k přenosu elektrických výkonů. Výkon přenášejí od primárních zdrojů (elektráren) k sekundárním zdrojům (rozvodnám, transformovnám) a od nich následně ke spotřebiteli. Požadavkem na venkovní vedení je, aby přenášely výkony hospodárně (s nejmenšími ztrátami), spolehlivě (s nízkou poruchovostí), bezpečně (bez ohrožení lidí a zvířat) a s minimálními zásahy do životního prostředí. [1]

1.1 Stožáry

Stožáry jsou důležitou částí celého rozvodného systému. Jejich funkcí je držet vodiče v dané výšce od země a také udržovat vzdálenosti mezi jednotlivými vodiči. Tvary a konstrukční řešení stožárů jsou navrženy tak, aby byly co nejlépe splněny funkční požadavky na stavební techniku, podmínky staveniště, výrobu, montáže (stožárů a vedení), údržbou apod. [1]

V článku [3] se uvádí dle konstrukčního řešení stožárů toto rozdělení:

- Jednodřívkové
 - Jako příklad jednodřívkového stožáru můžeme uvést stožár “soudek“ používaný na vedení 110 kV, nebo stožár “kočka“ používaný na vedení 400 kV.
- Portálové
 - Nejčastěji můžeme vidět dlouhý příčník podpíraný dvěma svislými dřívky čtyřboké konstrukce.
- Kotevné
 - Jsou konstrukčně i staticky podobné portálovým stožárům, jen jsou navíc přidána kotevní lana.

1.2 Přenosové trojfázové soustavy

V [1] se uvádějí tyto u nás používané přenosové trojfázové soustavy:

- 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.

Dále se v této práci zaměříme zejména na elektromagnetické pole vedení velmi vysokého napětí.

1.3 Parametry vodičů

Na venkovních vedeních můžeme najít tyto vodiče:

- Holé vodiče
 - Holé vodiče jsou na venkovních vedeních používány nejvíce, standardně se používají AlFe lana. Jsou to slané hliníkové lana s nosnou ocelovou duší. Kvůli zvýšení přenosové schopnosti vedení se někdy u těchto vodičů používá více svazků v jedné fázi.
- Jednoduché izolované vodiče vn
 - Používají se jako komprimovaná lana, která jsou slaná z drátů z hliníkové slitiny a jsou opatřena jednoduchou izolací. U těchto vodičů je menší ochranné pásmo v blízkosti vedení a používají se tedy tam, kde je požadavek na zúžení ochranného pásma.
- Slané závěsné kabely vn
 - Jedná se o svazkové třížilové závěsné kabely s plnou izolací a stíněním. Jsou zavěšeny pomocí ocelového lana a nevyžadují další izolaci.

Předchozí rozdělení vodičů je uvedeno v publikaci Provoz distribučních soustav [5].

U venkovních vedení velmi vysokého napětí se průřezy vodičů mezi různými napěťovými úrovněmi příliš neliší, protože nejefektivnější je přenášet výkon, který je blízký výkonu přirozenému. Při přenášení přirozeného výkonu je totiž účinnost přenosu nejvyšší. [4]

V knize Elektrické stanice a vedení [4] se uvádí následující použití AlFe lan.

Pro vedení 400 kV se používá trojsvazek lana AlFe s průřezy:

- $3 \times 450 \text{ mm}^2$,
- $3 \times 500 \text{ mm}^2$.

Pro vedení 220 kV se používají buď lana jednoduchá, nebo jako dvojsvazky s průřezy:

- 350 mm^2 ,
- 450 mm^2 ,
- $2 \times 210 \text{ mm}^2$.

Pro vedení 110 kV se používají také lana jednoduchá, nebo dvojsvazky průřezy:

- 185 mm²,
- 240 mm²,
- 450 mm²,
- 680 mm²,
- 2x350 mm²,
- 2x670 mm².

1.4 Výstavba nového vedení

Na výstavbu vedení se vztahují veškerá pravidla územního a stavebního řízení, a tudíž i posouzení vlivu stavby na životní prostředí (EIA). A to i v případech, že nové vedení se staví v trase stávajícího. Při projektování nového vedení se snažíme najít nejlepší řešení, jak z hlediska ochrany přírody a krajiny, tak z hlediska technickoekonomického. [2]

Zákon nařizuje zřízení ochranných pásem podél vedení, šířka těchto bezpečnostních koridorů je 12 metrů pro vedení 110 kV, 15 metrů pro vedení 220 kV a 20 metrů pro vedení 400 kV. Tato pásma se měří od krajního vodiče. Porost rostoucí v těchto koridorech nesmí být vyšší než 3 metry nad zemí. Tento požadavek je důležitý, protože vodiče vedení vykazují určitý průhyb, jenž je závislý na teplotě (při vyšší teplotě se zvýší průhyb vodiče). Teplota vodiče závisí na více faktorech: na okolní teplotě vzduchu, proudění vzduchu, zatížení vodiče apod. [2]

Dále je závaznými normami určena minimální vzdálenost objektů od vodičů pod napětím. U vedení 220 kV jsou to 4 metry a u vedení 400 kV je tato vzdálenost ještě o metr delší. Minimální vzdálenosti musí zamezit dotyku živých částí vedení s dřevinami, který by mohl způsobit zkrat a následný požár. [2]

2 Vliv elektromagnetického pole na lidský organismus

2.1 Srovnání přírodních polí s poli pod vedením

Člověk se dostával do kontaktu s elektromagnetickým polem již od svého zrodu (například magnetické pole Země). V našich podmínkách je indukce magnetického pole B přibližně $45 - 50 \mu\text{T}$ [6]. Toto pole nás chrání před působením kosmického záření. Ve srovnání s umělým magnetickým polem pod vedením vysokého napětí 400 kV, jehož velikost je při přenášení přirozeného výkonu přibližně $2,3 \mu\text{T}$ ve 2 metrech nad zemí. Velikost magnetického pole vedení je tedy přibližně 20 krát menší.

Kolem Země je také elektrostatické pole, které má intenzitu kolem 120 V/m [6]. Když tuto hodnotu srovnáme s hodnotou intenzity elektrického pole pod vedením velmi vysokého napětí 400 kV, jehož efektivní hodnota v praxi dosahuje až k $10\,000 \text{ V/m}$ ve 2 metrech nad zemí, zjistíme, že hodnota přírodního pole Země je přibližně 83 krát menší.

Toto srovnání je pouze pro naši představu a neříká nám téměř nic o působení na lidský organismus, protože srovnáváme pouze velikosti polí a neuvádíme jejich další parametry.

2.2 Elektromagnetická pole v běžném životě

S elektromagnetismem se v běžném životě setkáváme v mnoha formách (světelné, tepelné, rádiové vlny apod.). V dnešní moderní době používáme mnoho elektrospotřebičů (mobilních telefonů, vysílačky, WiFi sítě atd.) Jsme tak čím dál více obklopani uměle vysílanými elektromagnetickými vlnami. Nazýváme je tzv. elektromagnetickým smogem.

2.3 Působení elektromagnetického pole na lidský organismus

Při zkoumání účinků elektromagnetického pole na lidský organismus musíme uvažovat mnoho faktorů. Záleží na velikosti magnetické indukce, tvaru pole, kmitočtu, individuální citlivosti a na řadě dalších fyziologických faktorů. [7]

Magnetická indukce vzniká působením vnějšího magnetického pole. Toto pole působí na pohybující se náboje Lorentzovými silami a ty následně vyvolají elektrické pole. Jestliže je daný materiál vodivý, dochází ke vzniku elektrického proudu. Tato interakce může vyvolávat změny v proudění kapalin. Mezi tyto kapaliny patří i lidská krev. [7]

Tři způsoby, kterými může magnetické pole působit na živou tkáň (podle [6]):

1) Elektronová interakce: Mezi molekulami dochází k přenosu elektronů. Tento jev může vést buď k urychlení, nebo zpomalení některých chemických reakcí.

2) Elektromechanický efekt: Dochází ke změně orientace některých makromolekul, především kyseliny ribonukleové nebo bipolárních molekul vody. Dále probíhají změny aktivity některých enzymů a propustnosti buněčných membrán.

3) Magnetoelektrický efekt: Vzniká indukci vířivých proudů a elektrických potenciálů, které působí na mikroanatomické, ale i na větší struktury živého organismu.

2.4 Hygienické limity pro elektromagnetické pole

Světová zdravotnická organizace (World Health Organization, WHO) podporuje výzkum vlivu elektromagnetických polí na člověka, neustále sleduje vědecké publikace a výzkumné zprávy o problematice elektromagnetických polí. Mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením (ICNIRP, International Commission on Non-ionizing Radiation Protection), složená z nezávislých expertů, publikovala v roce 1998 „*Směrnice pro omezení expozice střídavým elektrickým, magnetickým a elektromagnetickým polím*“ [8]. Světová zdravotnická organizace pokládá dodržení stanovených limitů za dostatečnou ochranu zdraví. [8]

„*Česká republika uplatnila směrnici ICNIRP v nařízení vlády č. 480/2000 Sb. z 22. listopadu 2000, o ochraně zdraví před neionizujícím zářením*“ [8]. Dne 30. dubna 2008 bylo toto nařízení zrušeno a platí nové nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, ve znění nařízení vlády č. 106/2010 Sb. [9]

2.4.1 Ochrana před účinky elektromagnetického pole 50 Hz (ČSN 33 2040)

Podle § 3 zákona č. 142/1991 Sb., o československých technických normách je norma ČSN 33 2040 závazná v pravomoci Českého úřadu bezpečnosti práce na základě jeho požadavku.[11] Dle normy [10] musejí být splněny tyto požadavky:

1) Trvalý proud, který prochází lidským tělem a jeho povrchem při pobytu v elektrickém poli, nesmí být větší než 3,5 mA.

2) V místech blízkých elektrizační soustavy a přístupných pouze osobám s elektro-technickou kvalifikací musí být intenzita elektrického pole v prostoru provádění práce menší než 15 kV/m (tato hodnota se vztahuje k výšce 1,8 m nad zemí). Jedná se hlavně o pochůzkové trasy a pracoviště. Jestliže bude intenzita elektrického pole větší než 15 kV/m, pak maximální délka pobytu osob musí být kratší než:

- 1,5 hodiny denně, při intenzitě elektrického pole do 20 kV/m,
- 0,5 hodiny denně, při intenzitě elektrického pole do 25 kV/m.

3) Prostor okolo zařízení, kde je intenzita elektrického pole ve výšce 1,8 m nad zemí vyšší než 1 kV/m a nebo kde je intenzita magnetického pole vyšší než 0,1 mT, je definován jako pásmo vlivu. V tomto prostoru musí být vyloučeno skladování hořlavých a snadno vznětlivých látek (pohonné hmoty, sláma, seno apod.).

4) V pásmu vlivu zařízení v prostorách, které jsou přístupné osobám, nesmí magnetická indukce převýšit hodnotu 0,5 mT.

5) V případech, že se vedení kříží se silničními komunikacemi první a druhé třídy, je třeba vyloučit zastavení vozidel v pásmu vlivu elektrického pole a na zákaz je nutno upozornit dopravní značkou.

2.4.2 Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením (č. 1/2008 Sb.)

Nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením stanovuje hygienické limity pro nízkofrekvenční elektrické a magnetické pole a také pro statické magnetické pole. Podle tohoto nařízení se přípustnost expozice člověka v nízkofrekvenčním (do 10 MHz) elektrickém a magnetickém poli posuzuje podle modifikované proudové hustoty, která se působením těchto polí v těle člověka indukuje.

Nejvyšší přípustná hodnota modifikované proudové hustoty J_{mod} je stanovena pro zaměstnance:

$$J_{mod} = \sqrt{2} \cdot 0,01 \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (1)$$

což je přibližně $J_{mod} = 0,014 \left[\frac{A}{m^2} \right]$. Pro ostatní osoby je tato hodnota pětikrát nižší.

U vyšších frekvencí (100 kHz – 10 GHz) posuzujeme pole podle nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu (SAR), které jsou stanoveny v příloze (tabulka č. 2). U frekvencí (10 GHz – 300 GHz) nás zajímají nejvyšší přípustné hodnoty pro hustotu zářivého toku elektromagnetické vlny dopadající na tělo nebo na jeho část a jsou stanoveny v příloze (tabulka č. 3).

V této práci se zabýváme poli kolem venkovních vedení o frekvenci 50 Hz (ostatní frekvence jsou uvedeny v tabulkách č. 4 a 5 v příloze). Bude nás proto zajímat hustota elektrických proudů indukovaných vnějším elektromagnetickým polem a dále budeme řešit referenční úroveň intenzity elektrického pole pro nepřetržitou expozici, která je pro 50 Hz v nařízení vlády [9] stanovena hodnotou:

- pro zaměstnance $E = 10000 \text{ V/m}$,
- pro ostatní osoby $E = 5000 \text{ V/m}$.

Pro magnetickou indukci jsou stanoveny referenční hodnoty při frekvenci 50 Hz tyto:

- pro zaměstnance $B = 500 \cdot 10^{-6} \text{ T}$,
- pro ostatní osoby $B = 100 \cdot 10^{-6} \text{ T}$.

V nařízení vlády č. 1/2008 Sb. uvádí následující: Místa, která jsou veřejnosti volně přístupná, musí být označena výstrahou upozorňující fyzické osoby používající kardiostimulátor na možné riziko, jestliže v nich jsou podle hodnocení expozice ostatních osob překročeny referenční hodnoty v pásmu frekvencí 0 Hz – 300 Hz.

2.5 Výzkumný projekt Světové zdravotnické organizace

Světová zdravotnická organizace začala roku 1997 pracovat na výzkumném projektu. Cílem tohoto projektu bylo zjištění, zda kromě dvou dříve zaznamenaných krátkodobých účinků (ohřev tkáně těla a dráždění nervové soustavy) elektromagnetického pole na člověka by bylo možné odhalit ještě účinky jiné, například dlouhodobé. Pokouší se odhalit souvislost mezi těmito účinky a závažnými onemocněními jako je rakovina, Parkinsonova nebo Alzheimerova choroba. [12]

A na jaké otázky se během tohoto projektu podařilo najít odpověď? Můžeme je shrnout do následujících čtyř bodů (podle [12]):

1) Záleží na typu modulace (impulzní, amplitudová, frekvenční)? Je jejich vliv na zdraví člověka odlišný?

2) Způsobuje dlouhodobá expozice člověka s intenzitou pod limity ICNIRP 1998 rakovinu nebo jiná onemocnění?

3) Je možné dokázat přecitlivělost některých osob k působení elektromagnetického pole? Způsobují elektromagnetická pole s intenzitou pod limity ICNIRP 1998 těmto osobám zdravotní problémy?

4) Byla prokázána souvislost mezi expozicí magnetického pole vedení vysokého napětí a výskytem dětské leukémie?

Ad 1) Je známo, že tepelné účinky vysokofrekvenčního elektromagnetického pole jsou závislé jen na jeho efektivních hodnotách. Vliv modulace by se mohl projevit pouze tehdy, kdyby se při absorpci vysokofrekvenční energie v tkáni uplatnily nelineární procesy. Tyto procesy by museli elektromagnetickou vlnu alespoň částečně demodulovat. Následně by se v těle mohly objevit i proudy (elektrická pole) s frekvencí modulace. Nízkofrekvenční proudy by poté dráždily nervovou soustavu a bylo by nutné hodnotit je paralelně s ohříváním tkáně.

Závěr tohoto projektu je, že žádné další působení modulace nebylo zjištěno, a proto zůstává přeměna vysokofrekvenčního záření na teplo jediným potenciálně škodlivým vlivem.

Ad 2) Kvanta elektromagnetického pole do 300 GHz mají energii zhruba stokrát menší než je energie tepelného pohybu molekul v živé tkáni, proto můžeme očekávat při absorpci vysokofrekvenční energie v tkáni těla pouze účinky tepelné. Při absorpci fotonu můžeme pozorovat zvýšení vnitřní energie molekuly. Zvýšení energie molekuly se projeví na rotaci molekuly a u větších molekul i na energii vibrační. Tato energie se následně předává mezi molekulami při jejich srážkách a mění se na energii translační (rychlost pohybu molekuly), nebo na energii rotační. Změny těchto energií při absorpci kvanta elektromagnetického pole jsou velmi malé a nemohou vést ke změně struktury molekuly. Molekuly důležité pro životní

funkce jsou dostatečně robustní, proto se jejich struktura při tepelných srážkách nemění, dokonce ani při absorpci stokrát méně energetických kvant elektromagnetického záření.

I přesto proběhlo mnoho výzkumů, které se snažily najít změny po ozáření vysokofrekvenčním zářením. Tyto změny by narušily funkci důležitých molekul, například přetrháním řetězců v molekulách DNA. Doposud se nepodařilo najít důkaz poškození molekuly v buňkách živé tkáně elektromagnetickým zářením do frekvence 300 GHz.

Ad 3) Elektromagnetická hypersenzitivita je údajná vlastnost podobná alergii, jen s rozdílem, že se zde nejedná o reakci na chemické či biologické látky, ale o reakci na slabá elektromagnetická pole. Pojem elektromagnetická hypersenzitivita vznikl zhruba před třiceti lety, kdy se tímto pojmem švédský profesor Bergqvist snažil vysvětlit potíže, které hlásili někteří pracovníci obsluhující počítačové monitory. Tyto potíže byly např. svědění kůže a vyrážky. Postupem času se problémy rozšířily i na jiná elektrická zařízení generující elektromagnetická pole. Soupis zdravotních potíží se značně rozšířil.

Přes velké úsilí a finanční zajištění se příčinný vztah mezi expozicí ve slabém elektromagnetickém poli a zdravotními potížemi nikdy nepodařilo prokázat. Samotná představa o hypersenzitivitě může vytvořit podmínky pro psychogenní onemocnění lidí citlivých nikoli k elektromagnetickému poli, nýbrž ke zprávám o jeho zhoubném působení. Podobné vysvětlení publikovali již v roce 1995 tři švédští profesori (Göthe, Odont, Nilsson). Napsali, že se jedná o psychosomatický syndrom.

Ad 4) Také odpověď na otázku, zda má nízkofrekvenční magnetické pole vedení velmi vysokého napětí příčinnou souvislost se vznikem dětské leukémie, je velice důležitá. První statistickou souvztažnost mezi těmito dvěma parametry ohlásili v roce 1979 N. Wertheimer a E. Leeper.

Od té doby bylo na toto téma provedeno několik desítek epidemiologických studií. Na základě zjištění slabého, ale statisticky významného zvýšení výskytu dětské leukémie u dětí, bydlících blízko vedení velmi vysokého napětí, zařadila v roce 2002 mezinárodní agentura pro boj s rakovinou (IARC) nízkofrekvenční magnetické pole do skupiny 2B karcinogenů (podezřelý karcinogen pro člověka).

Doposud ale chybí fyzikálně akceptovatelný mechanismus, kterým by se toto zjištění mohlo vysvětlit. Byly také provedeny pokusy na zvířatech a buněčných kulturách, které ani při řádově vyšších hodnotách polí, nezjistily karcinogenní vliv nízkofrekvenčního magnetického pole.

Na toto téma proběhl v roce 2005 výzkum, který provedl Dr.G.Draber. S použitím databáze s více než devíti tisíci případy dětské leukémie (v Británii) hledal výskyt nemocných blízko vedení vysokého napětí. Zvýšený výskyt nemocí, který našel, byl zjistitelný až do vzdálenosti 600 metrů od vedení. Je jasné, že za tímto jevem nemůže stát elektromagnetické pole vedení, neboť je v této vzdálenosti mnohem menší, než pozadí způsobené rozvodem elektrického proudu v bytech. Objevilo se mnoho spekulací o tom, co za tím může být. Jednou z nich je vliv iontů, které z korónového výboje na vodičích odnáší vítr do velké vzdálenosti. Nicméně mechanismus, kterým by tyto ionty způsobovaly dětskou leukémií, nebyl nikdy popsán.

V roce 2011 vydala Mezinárodní agentura pro boj s rakovinou (IARC) prohlášení, v němž zařadila do skupiny 2B karcinogenů i vysokofrekvenční elektromagnetické pole. [13]

3 Vliv elektromagnetického pole na elektrická zařízení

3.1 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

EMC je schopnost systémů nebo zařízení fungovat ve svém elektromagnetickém prostředí a přitom nevytvářet nepřijatelné elektromagnetické rušení pro cokoli v tomto prostředí. Elektromagnetické prostředí je způsobeno zejména elektromagnetickými poli jiných zdrojů rušení. Mezi tyto zdroje patří: motory, spínače, stykače, zářivky a venkovní vedení. Vazebním médiem (cestou elektromagnetického rušení) může být vzdušný prostor, energetická soustava (kabely, vodiče, stínění). Mezi přijímače rušení můžeme zařadit výpočetní techniku, citlivé měřicí přístroje, telekomunikační soustavy, systémy přenosu dat, radiopřijímače, TV apod. Opatření, která omezí rušení přijímače, lze realizovat jak na straně přijímače, tak na vazebním médiu či na zdroji rušení. [20]

3.2 Rušení

Podle kmitočtového spektra a fyzikálního působení můžeme rušení rozdělit na energetické, akustické a rádiové. Energetické rušení způsobuje hlavně zkreslení napájecího napětí a odebíraného proudu elektro-energetických sítí. Toto rušení se projevuje u zařízení, jež jsou závislá na tvaru křivky elektrického napětí. Největšími zdroji tohoto rušení jsou řízené polovodičové měniče velkých výkonů. Akustické rušení je rušení v pásmu nižším než 20 kHz. Má negativní vliv zejména na přenosové a informační systémy (sdělovací a informační soustavy, měřicí a řídicí zařízení, telefony, rozhlas). Zdrojem tohoto rušení jsou prakticky všechny zdroje energetického rušení a kromě toho také radary a napájecí sítě o kmitočtu 50 až 400 Hz. Rádiové rušení je elektromagnetické rušení, které má podle telekomunikačního řádu spektrální složky v pásmu 10 kHz až 3000 GHz. [20]

3.2.1 Přijímače rušení

Jako přijímače rušení v elektromagnetickém poli můžeme označit všechny vodivé smyčky. Může se jednat o smyčky na mikročipu nebo o smyčky elektrického vedení. [20]

V závislosti na velikosti a trvání rušivého napětí můžeme pozorovat tyto účinky (dle [20]):

- Porucha se nachází pod přípustnou úrovní rušení (nevznikají poruchy zařízení).
- Porucha se nachází nad přípustnou úrovní rušení, ale je velice krátká na to, aby způsobila poruchu zařízení.
- Porucha se nachází nad přípustnou úrovní rušení a trvá déle. Může tedy působit jako normální signál, na který zařízení reaguje, a to může vést k chybné reakci systému.
- U systémů s bit-sériově přenášenou informací může být porucha datovým jištěním rozpoznána a dojde k opakovanému přenosu informace.
- Když rušivé napětí přestoupí hranici poškození, dojde až k poškození daného zařízení.

3.2.2 Vazební okruhy (cesty) rušení

Zdroje rušení působí většinou na jiné proudové okruhy např. silnoproudé na řídicí okruhy. Toto působení se podle [20] rozlišuje na induktivní, kapacitní nebo galvanické vazby.

Kapacitní vazba

Tato vazba vzniká při napěťovém rozdílu zdroje a přijímače rušení (např. mezi dvěma vedeními) vlivem kapacity, mezi nimiž protéká proud. Napěťový rozdíl může nastat mezi různými kabelem, kabelovými žilami a konstrukcí zařízení. Kapacitní vazbu lze částečně eliminovat stíněním, které musí být uzemněno.

Induktivní vazba

Při změně magnetického pole dochází ve vodičích proudového okruhu ke vzniku napětí. Změny magnetického pole mohou být způsobeny přenášeným střídavým proudem a z vodičů zajišťujících vyrovnávání potenciálu (blesk, zemní spojení).

Galvanická vazba

Galvanická vazba nastává při propojení proudových okruhů různých vedení. Propojení může být způsobeno např. zkratem, přeskokem, snížením izolace nebo také galvanickým propojením s jinými vodiči, pokud protékají vyrovnávací proudy.

Kombinovaná vazba

Kombinovaná vazba může vzniknout tam, kde jsou kapacitní a zároveň induktivní vazby. U této vazby se mohou objevit rezonanční jevy, které mohou mít za následek vysoké rezonanční napětí. Je třeba, aby vlastní frekvence okruhů nebyla blízká provozní a rušivé frekvenci.

Elektromagnetické záření – vazba při vyzařování

Tato vazba má význam jen u vysokofrekvenčních pochodů, které jsou buď krátkodobé, nebo dlouhodobé. Mezi krátkodobé se řadí například blesky a spínací pochody. Mezi dlouhodobé patří rádiové, televizní vysílání nebo vysokofrekvenční přenos signálu.

3.2.3 Rušení od venkovních vedení

Vedením či rozvodným zařízením vysokého a zvláště vysokého napětí může být generován také vysokofrekvenční šum. Tento šum je generován v širokém rozsahu kmitočtů (0,15 MHz až 300 MHz). Šum v rozsahu 0,15 MHz – 30 MHz může nepříznivě ovlivnit zejména rozhlasové vysílání s amplitudovou modulací a šum v rozsahu 30 MHz – 300 MHz ovlivňuje vysílání televizní a rozhlasové s frekvenční modulací. Nad 300 MHz je hladina vysokofrekvenčního šumu tak nízká, že rušení je nepravděpodobné. [14]

Zdroje vysokofrekvenčního rušení dle [14]:

- vysoce namáhané izolátory,
- střídavá elektrická vedení,
- přerušovaná a nedokonalá spojení,
- stejnosměrná vedení.

Vznik vysokofrekvenčního šumu je závislý na povětrnostních vlivech. Například výskyt koróny kolem vodičů je častější za mokra. Někdy může zvýšená vlhkost být i prospěšná, kdy kapky vody mohou přemostit nedokonalé kontakty a šum omezit. Jiskření na izolátorech a následně vzniklé rušení se vyskytuje i za sucha, ale jeho výskyt je častější při vlhku, při námraze nebo mlze. [14]

Z toho vyplývá, že pokud se rušení od vedení projevuje za deště, je způsobeno korónou. Jestliže se projevuje za pěkného počasí a při dešti nebo mlze se sníží, jsou jeho zdrojem s velkou pravděpodobností nedokonalé spoje. [14]

Koróna

Koróna je slabě světélkující elektrický výboj, vznikající v blízkosti vodiče. Vzniká, jestliže intenzita elektrického pole u vodiče překročí mezní hodnoty. Dojde k překročení maximálního elektrického namáhání a následně k ionizaci plynu kolem vodiče. Koróna na vodičích generuje vysokofrekvenční šum, který může způsobovat rušení rádiového příjmu. Koróna je doprovázena slabým zvukovým efektem „sršením“. Díky ní dochází ke zvýšení přídatných ztrát na vedení. [14]

Podle [14] je vznik koróny závislý na:

- napětí na vodiči,
- průměru vodiče (se zvyšujícím se průměrem vodiče vzrůstá hladina vf šumu),
- vzdálenosti od země a ostatních vodičů,
- stavu povrchu vodiče,
- atmosférických a povětrnostních podmínkách (hustota vzduchu a tím i jeho elektrická pevnost je závislá na atmosférickém tlaku a okolní teplotě).

4 Rozložení elektrického a magnetického pole vedení

4.1 Modelování elektrických a magnetických polí v programu Agros2D

Program Agros2D vytvořila skupina lidí na Západočeské univerzitě v Plzni. Jedná se o multiplatformní C++ aplikaci, která využívá knihovny Hermes pro řešení parciálních diferenciálních rovnic. V programu Agros2D lze řešit elektrostatické, elektrické proudové i magnetické pole, přenos tepla, stavební mechaniku a akustické pole. [24]

4.2 Matematický model

Analýza fyzikálního pole je zpravidla rozdělena do tří základních etap:

- předběžné zpracování (preprocessing) – volba druhu řešeného fyzikálního pole, výběr souřadnicového systému, vytváření modelu a definice jeho geometrických rozměrů, přiřazení materiálových vlastností, aplikace okrajových podmínek a podmínek na rozhraní, generování sítě,
- řešení (processing) – automatické řešení úlohy,
- následné zpracování (postprocessing) – vyhodnocení řešené úlohy, grafická interpretace výsledků.

Při pomalých časových změnách (pole o frekvenci 50 Hz) lze zanedbat posuvný proud (druhý člen pravé strany v první Maxwellovy rovnice). V tomto případě Maxwellovy rovnice nabývají tvaru:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (2)$$

Je uvažován kartézský souřadnicový systém. V jednotlivých oblastech předpokládáme lineární prostředí, tj. $\mu = \text{konst.}$, $\gamma = \text{konst.}$. Dále předpokládáme harmonický průběh proudu, což umožňuje přejít na symbolicko-komplexní zobrazení. Při využití vztahů $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ a $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ je rozložení elektromagnetického pole nyní možno popsat parciální diferenciální rovnicí pro fázor magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} ve tvaru:

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot } \mathbf{A}) + j\omega\gamma\mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (3)$$

kde \mathbf{J}_{ext} je vnější proudová hustota a v mém případě je pravá strana této rovnice nulová. Pro oblast vzduchu platí, že relativní permeabilita μ_r je rovna 1 a měrná elektrická vodivost γ je nulová. Bylo zjištěno, že změna měrné vodivosti půdy má zanedbatelný vliv na řešené hodnoty.

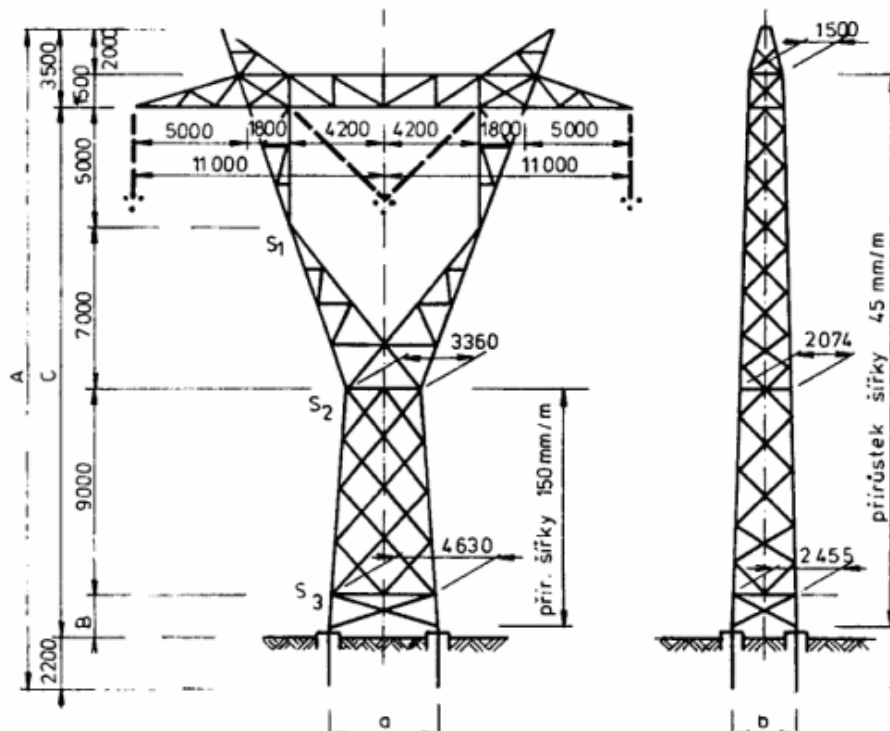
Okrajová úloha je tedy formulována pro magnetický vektorový potenciál. Definujeme dvojrozměrnou oblast Ω . Na hranici této oblasti platí okrajová podmínka:

$$\mathbf{A}_z = 0. \quad (4)$$

Rozmístění jednotlivých vodičů v oblasti je dáno typem stožáru, což je uvedeno v následujících kapitolách.

4.3 Elektrické a magnetické pole vedení 400 kV

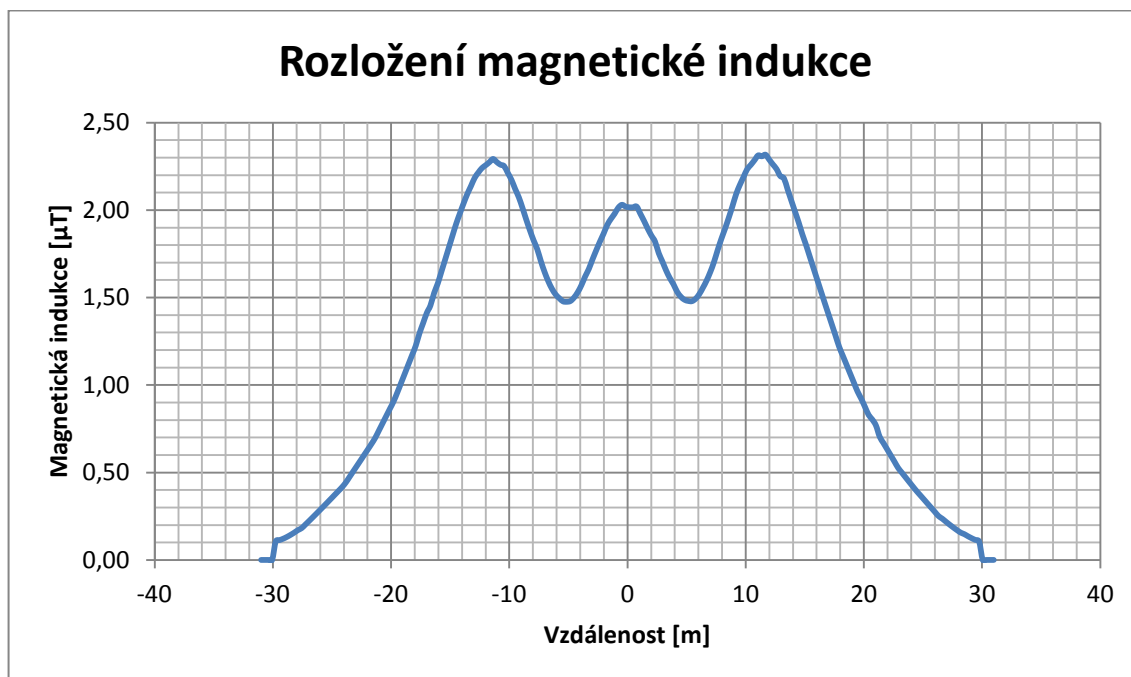
Pro následující výpočet jsem si vybral vylehčený stožár typu „kočka“, který se používá u vedení 400 kV.



Obr. č. 1 – Vylehčený stožár vedení 400 kV („kočka“), (převzato z [3])

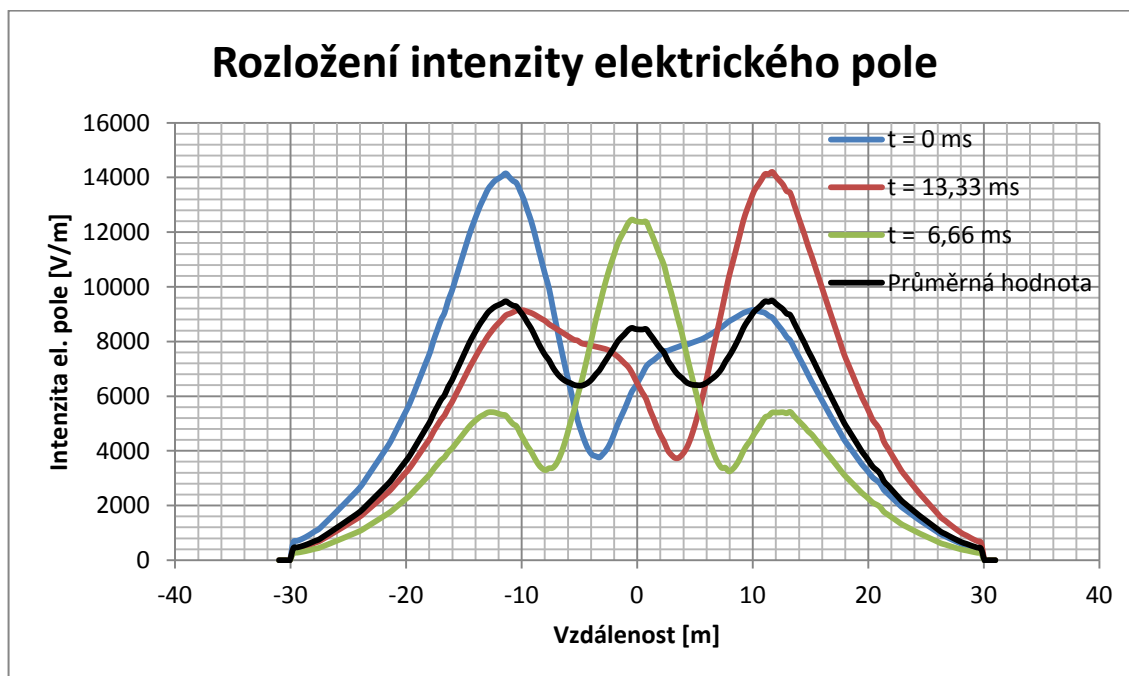
„Linky 400 kV jsou provedeny svazkovými vodiči, tzn., že každá fáze sestává ze tří vodičů vzdálených od sebe 30 až 40 cm.“[16] Dle [16] volím pro výpočet vzdálenosti mezi svazkovými vodiči 35 cm a vodiče s průřezem 450 mm². Výšku vodičů nad zemí vybírám pro nejhorší možný případ, který může nastat. Pro vodiče vedení 400 kV je tato výška 8 m nad zemí. [22] Podle [17] předpokládám, že přirozený výkon vedení je $P_p = 580$ MW. Z tohoto výkonu určím proud jednou fází $I = 840$ A.

Pro tento proud jsem pomocí programu Agros2D zjistil rozložení magnetické indukce ve výšce 1,8 metru nad zemí (podle ČSN 33 2040). Z obrázku č. 2 můžeme vidět, že nejvyšší povolené hodnoty magnetické indukce nebyly překročeny.



Obr. č. 2 – Rozložení magnetické indukce

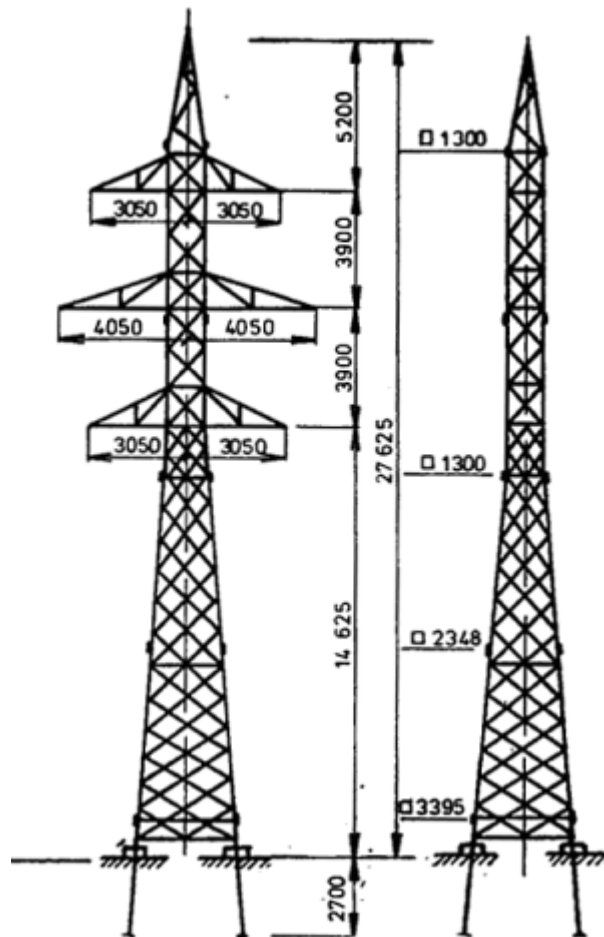
Na dalším obrázku č. 3 je zakresleno rozložení intenzity elektrického pole v jednotlivých časech. Nejvyšší povolené hodnoty z nařízení vlády č. 1/2008 Sb. jsou pro ostatní osoby dvojnásobně překročeny.



Obr. č. 3 – Rozložení intenzity elektrického pole

4.4 Elektrické a magnetické pole vedení 110 kV

Pro výpočet na hladině 110 kV jsem si vybral výztužný stožár typu "soudek" pro dvojitě vedení s těžkými vodiči 6 450 AlFe + 185 AlFe 3. Přirozený výkon pro dvojitě vedení volím dle [19] $P_p = 65$ MW. Každou fází tedy protéká proud $I = 170$ A.

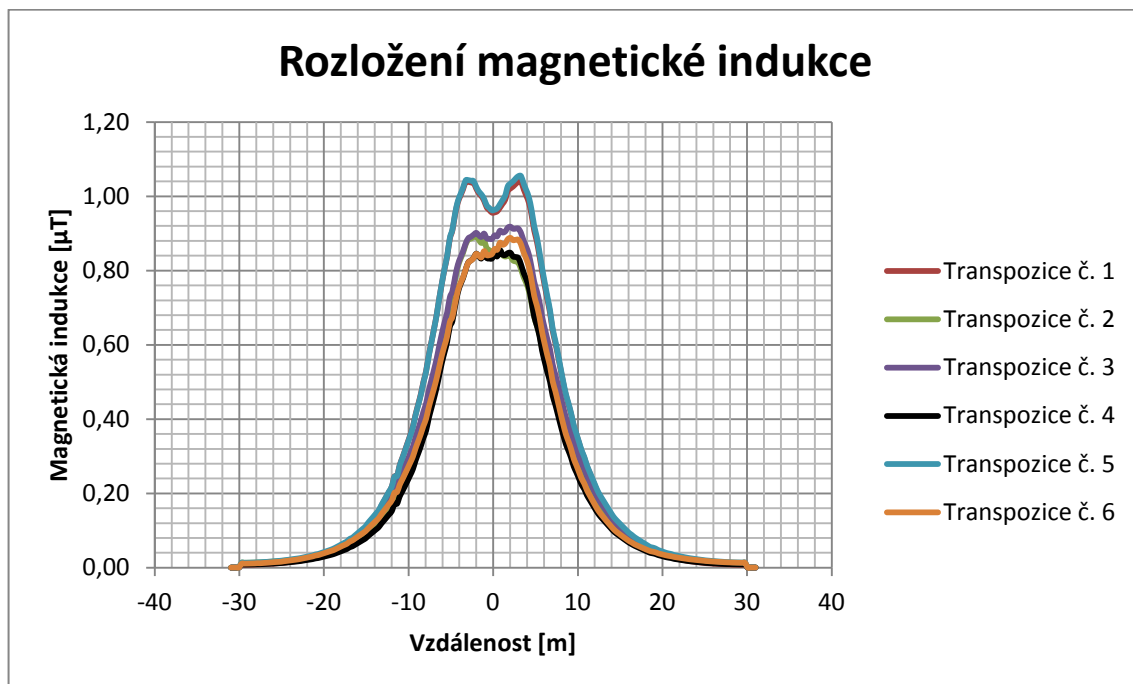


Obr. č. 4 – Výztužný stožár vedení 110 kV ("soudek"), (převzato a upraveno z [3])

Pro tento proud bylo zjištěno rozložení magnetické indukce ve výšce 1,8 metru nad zemí a je zobrazeno na obrázku č. 5. Nejvyšší povolené hodnoty magnetické indukce nebyly překročeny.

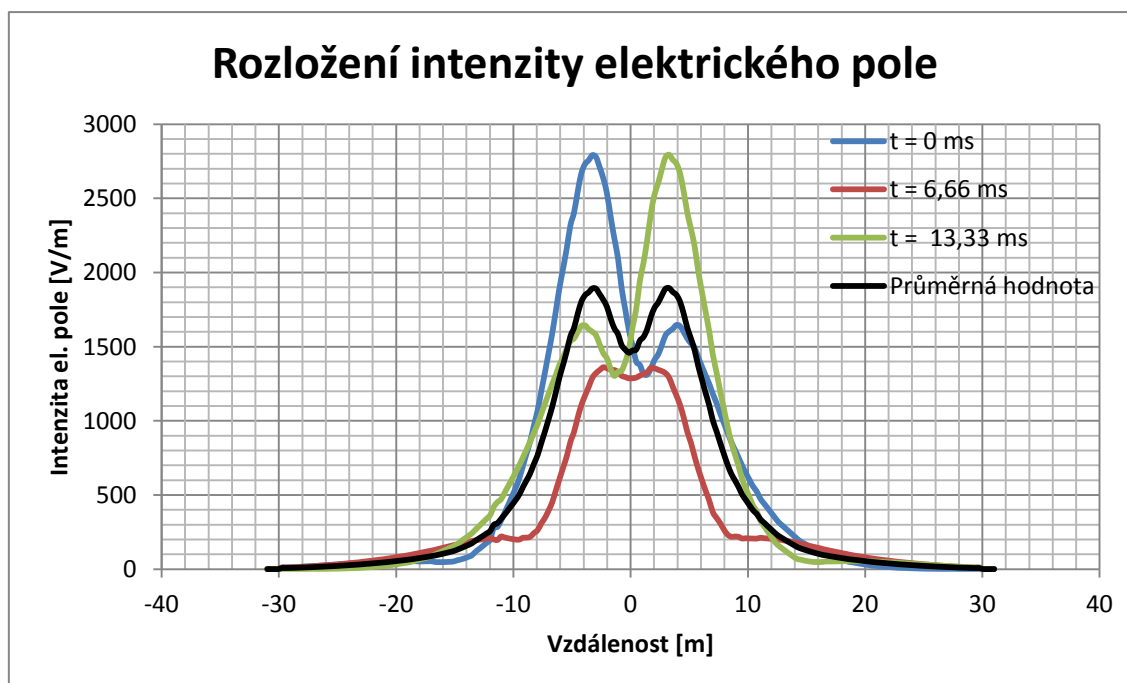
Na obrázku č. 5 můžeme dále vidět vliv šesti základních uspořádání vodičů na výsledné magnetické pole. Jako nejlepší rozložení fází můžeme určit transpozici č. 4. Transpozice 5 a 1 jsou téměř identické a jsou to nevhodná uspořádání vodičů.

Transpozice		
● X ○	● X ○	č. 1
● X ○	● X ○	č. 2
● X ○	● ○ X	č. 3
● X ○	○ X ●	č. 4
● X ○	X ● ○	č. 5
● X ○	○ ● X	č. 6



Obr. č. 5 – Rozložení magnetické indukce

Na obrázku č. 6 je zakresleno rozložení intenzity elektrického pole vedení 110 kV v jednotlivých časech. V tomto případě nebyly nejvyšší povolené hodnoty pro ostatní osoby překročeny.



Obr. č. 6 – Rozložení intenzity elektrického pole

5 Možnosti potlačení vlivu elektromagnetického pole

5.1 Elektromagnetické pole v budovách

Zdroj [15] uvádí, že pro omezení elektromagnetického pole v místech dlouhodobého pobytu je nutné omezit používání elektrických přístrojů. Jedná se hlavně o ložnice a jiná místa odpočinku. Dokonale omezit elektromagnetické pole vnitřních rozvodů můžeme jedinečně tím, že tyto obvody odpojíme od elektrické sítě. Odpojení od sítě můžeme provést například tak, že na noc vypneme jističe v rozvaděči. Vypínat jističe každý večer není moc pohodlné. Tento problém odstraňuje moderní inteligentní elektroinstalace, kde si může uživatel nastavit, které zásuvkové nebo světelné obvody bude chtít odpojit a které nechat zapnuté. Například ledničku, kotel, ohřívač vody či oběhové čerpadlo by asi nebylo rozumné vypínat.

Naskýtá se otázka, zda toto velmi slabé pole může ovlivňovat zdraví lidí, nebo jde jen o působení sugesce. V každém případě odpojení přístrojů není na škodu. Například vypnutí tzv. stand-by spotřebičů může přinést úsporu elektrické energie. Odpojení od sítě přináší také uživateli jistotu, že nemůže v noci dojít ke vzniku požáru vadným elektrospotřebičem.

5.2 Elektromagnetické pole v okolí venkovních vedení

5.2.1 Omezení vlivu kapacitní a induktivní vazby

Rozvodné energetické společnosti mají povinnost učinit opatření, aby se zabránilo potenciálně nebezpečným nebo jen nepříjemným indukčním vlivům. Mezi zúčastněnými (např. majiteli pozemků v blízkosti vedení a rozvodnými společnostmi) musí být dohodnutá vhodná opatření. Těmito opatřeními mohou být optimalizace zdrojů vhodným uspořádáním systémů či odpovídající stínění. Tato stínění jsou velice účinná proti působení elektrických polí, ale není žádný prakticky použitelný způsob (ve velkém měřítku) k odstínění magnetických polí. [21]

Časté riziko je u kovových konstrukcí a objektů, do kterých se indukuje nebezpečné napětí. Toto riziko lze omezit elektrickým propojením se zemí, proto by každá část měla být vodivě spojená se zemí. [21]

5.2.2 Omezení vlivu elektromagnetického záření

Pro snížení velikosti rušivého signálu je důležitá pravidelná údržba vedení. [14] Omezení rušení se řeší již při návrhu vedení, kdy se pomocí předpovědních metod navrhuje vedení tak, aby rušení bylo co nejmenší. [21] Největší vliv na rušení má průměr vodiče a počet vodičů ve svazku fáze. Menší vliv se připisuje vzdálenostem mezi fázemi, výšce vodičů nad zemí a vzdálenosti vodičů ve svazku. [14]

Použitím svazkových vodičů se zvýší napětí, při němž vzniká na vodičích koróna. Je to dáno tím, že na povrchu svazkových vodičů je intenzita elektrického pole nižší, než je u jednoho ekvivalentního vodiče. Při použití svazkových vodičů se tedy sníží velikost ztrát korónou, dokonce je menší i rušení telekomunikačního signálu. Toto řešení se používá od napětí 220 kV a od 400 kV jsou již svazkové vodiče nezbytné. [18]

Dále je třeba dát pozor, aby při výstavbě vedení nedošlo k poškození vodičů, neboť právě poškozené vodiče mohou být významným zdrojem rušení. [21] Nečistoty vodičů mohou také způsobit rušení. Povrch vodiče se nedoporučuje mazat tukem, který by měl sloužit jako ochrana při dopravě a napínání. Mohlo by dojít k vytékání tuku na povrch vodiče a tam by se shromažďovala nečistota. Tak by mohlo vzniknout místo s vysokým lokálním gradientem a následným vysokofrekvenčním šumem. [14]

Při návrhu je nutné věnovat pozornost rozměrům kovových armatur, jako jsou nosné a závěsné svorky, třmeny a ochranné kruhy. Neměla by se na nich vyskytovat místa s vysokým gradientem. Veškeré rohy a hrany (např. hlavy šroubů) by měly být zakulacené nebo stíněné. [14]

Je-li povrch znečištěného izolátoru vlhký, jiskry přeskakují místa vysušená svodovými proudy a dochází ke vzniku vf šumu. Řešením tohoto problému je omezení svodových proudů na povrchu znečištěných izolátorů. Toho lze dosáhnout pokrytím povrchu izolátoru silikonovým tukem, použitím speciálních typů izolátorů z organických materiálů nebo opatřených polovodivou glazurou. [14]

6 Reálná měření

Reálně změřit vlivy elektromagnetických polí na lidský organismus není s ohledem na rozsah této práce možné. Z tohoto důvodu se zaměřím jen na indukovaný proud. Představme si člověka za deště procházejícího pod vedením 400 kV. V ruce drží deštník a chce si odpočinout opřením se o uzemněné kovové zábradlí. Měření má za cíl zjistit, jaký proud bude přes něj protékat do země. Vodiče měřeného vedení byly ve výšce 10 m nad zemí. Výšku deštníku uvažujeme od rukojeti k zemi. Jedná se o deštník 1 m vysoký s poloměrem 0,6 m.

Elektrický proud má na lidské tělo účinek přímo úměrný velikosti procházejícího proudu. Velikost střídavého proudu, který není lidskému tělu nebezpečný je 3,5 mA (10 – 100 Hz) [23]. V [23] se rozlišuje proud podle nebezpečnosti na:

- 0,5 – 1 mA – práh vnímání elektrického proudu,
- 1 – 8 mA – podráždění v nervech,
- 6 – 15 mA – tento proud způsobuje tetanickou křeč (člověk se nemůže uvolnit),
- 25 mA – tetanická křeč dýchacího svalstva,
- 60 mA – fibrilace srdeční komory a přechodná zástava srdce,
- Nad 80 mA – trvalá zástava srdce.

6.1 Měření č. 1

Byly použity dva druhy měření.

6.1.1 Měření napětí

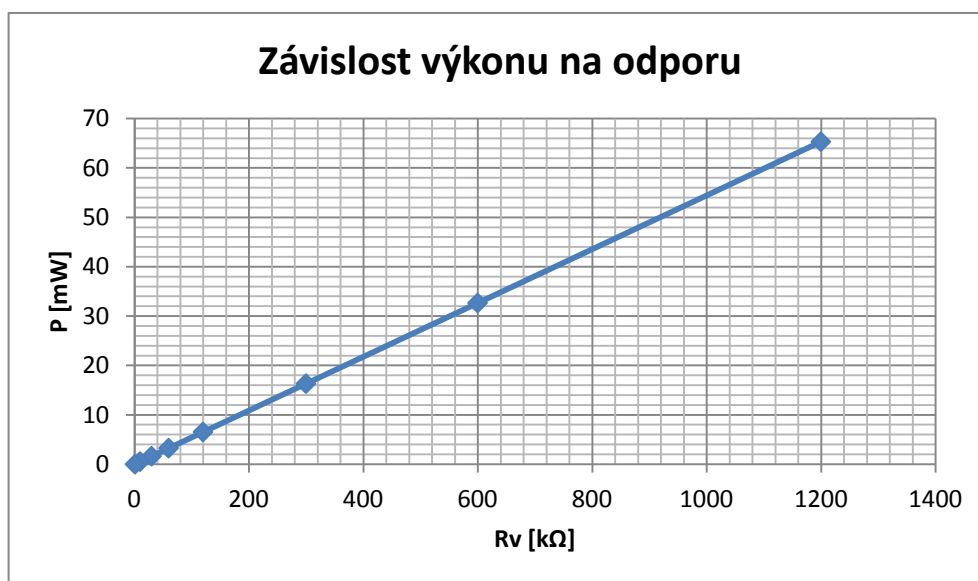
Mezi deštník a zemnicí tyč byl připojen analogový V-metr s vnitřním odporem R_v . Z naměřené hodnoty napětí U a z vnitřního odporu byl vypočten protékající proud I a následně výkon P ztracený na V-metru.

Mezi vedením a deštníkem je kapacitní vazba, proto si můžeme tuto situaci zjednodušeně představit jako kondenzátor zapojení v sérii s rezistorem. Kondenzátor je tvořen vodiči vedení a kovovými částmi deštníku. Dielektrikem je vzduch, rezistor představuje vnitřní odpor V-metru. Touto metodou byly naměřeny hodnoty uvedené v tabulce č. 1.

Tab. č. 1

Rozsah [V]	R_v [k Ω]	U [V]	I [μ A]	P [mW]
600	1200	280	233,3	65,3
300	600	140	233,3	32,7
150	300	70	233,3	16,3
60	120	28	233,3	6,5
30	60	14	233,3	3,3
15	30	7	233,3	1,6
6	10	2,3	230,0	0,5

Z těchto hodnot jsem vypočetl přibližnou kapacitní reaktanci vzduchového kondenzátoru $X_c = 1 \text{ G}\Omega$ a kapacitu $C = 3,2 \text{ pF}$. Můžeme vidět, že impedance rezistoru je oproti impedanci vzduchového kondenzátoru zanedbatelná, a proto má zanedbatelný vliv na procházející proud. Nyní si představme deštník jako zdroj proudu s vnitřní impedancí $1 \text{ G}\Omega$. Z této představy zjistíme, že čím vyšší impedanci připojíme, tím vyšší výkon na ní bude (platí pouze pro impedance, jejichž hodnota je menší než impedance zdroje).



Obr. č. 7 – Závislost výkonu na odporu

6.1.2 Měření proudu

Deštník byl připojený přes analogový A-metr přímo k zemi tyči. Tímto měřením byl naměřen proud $240 \mu\text{A}$. Měření bylo prováděno ve stejné výšce a na stejném místě jako měření napětí. Rozdíl je $6,7 \mu\text{A}$, tedy $2,8 \%$ od předchozího měření (6.1.1.). Pro následující měření je použita tato metoda. Průměrná impedance lidského těla je $2 \text{ M}\Omega$ [23] a je tedy zanedbatelná k impedanci myšleného vzduchového kondenzátoru. Proud, jenž protékal A-metrem, by protékal i člověkem.

6.2 Měření č. 2

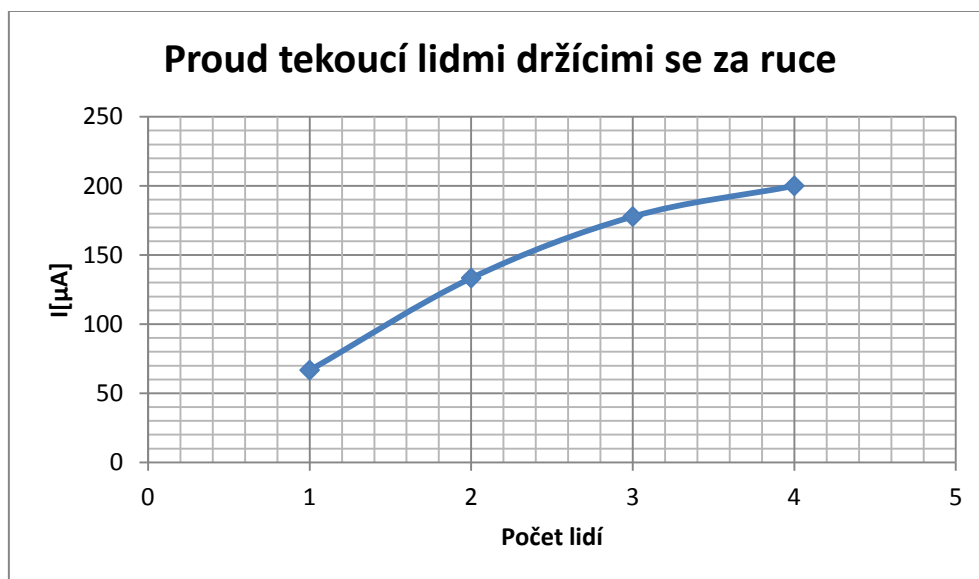
Následující graf ukazuje, jak se mění proud procházející lidským tělem se vzrůstající výškou deštníku nad zemí. Bylo měřeno pod krajní fází venkovního vedení 400 kV.



Obr. č. 8 – Závislost proudu na výšce deštníku

6.3 Měření č. 3

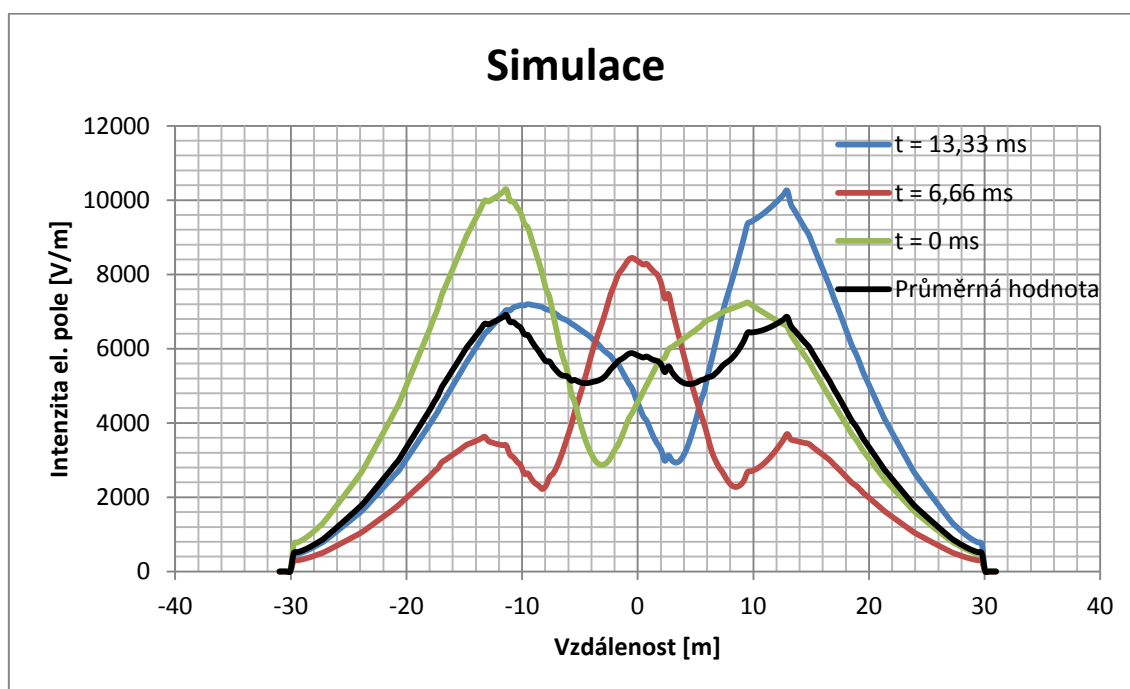
Při tomto měření nebyl použit deštník, ale měřil se rovnou proud indukovaný těla do člověka stojícího na suché zemi s roztaženými rukama. První osoba držela v pravé ruce vodič připojený k měřicímu přístroji a druhá osoba se chytila za levou ruku první osoby. Tímto způsobem se připojovali další osoby a byl vytvořen „řetěz“, který se táhl rovnoběžně pod krajním vodičem vedení.



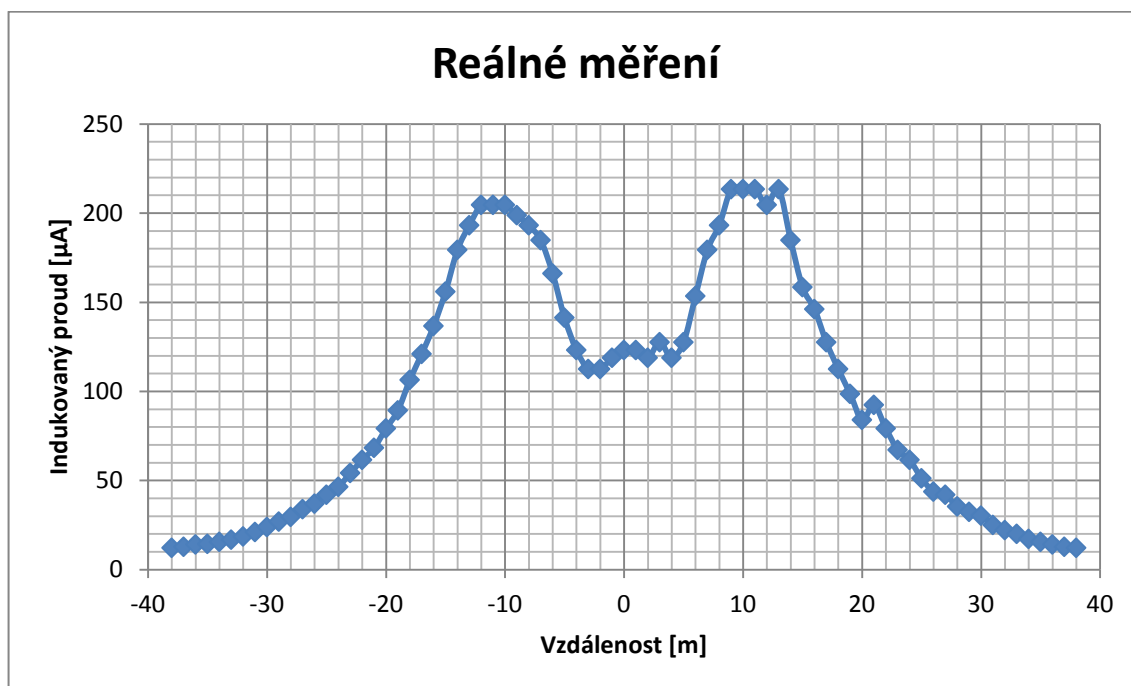
Obr. č. 9 – Proud tekoucí lidmi držícími se za ruce

6.4 Měření č. 4

Tímto měřením ověříme velikost intenzity elektrického pole pod vedením v závislosti na vzdálenosti od vodičů. Na následujícím grafu č. 10 můžeme vidět teoretické rozložení elektrického pole vedení vytvořené v programu Agros2D. Můžeme říci, že indukovaný proud do deštníku je úměrný elektrickému poli. Z tohoto lze dojít k závěru, že průběh elektrického pole a indukovaného proudu budou vykazovat podobné rozložení. Na grafu č. 11 můžeme vidět průběh indukovaného proudu reálně změřeného pomocí deštníku. Porovnáme-li tyto průběhy, dojdeme k závěru, že se výrazně liší pouze ve třech místech (obě špičky pod krajními fázemi a vyšší intenzita u prostřední fáze). Může to být způsobeno velikostí deštníku, protože deštník není bodový snímač.



Obr. č. 10 – Simulace (rozložení intenzity el. pole)



Obr. č. 11 – Reálné měření (rozložení indukovaného proudu)

7 Závěr

Laická veřejnost žijící v blízkosti vedení vysokého napětí často podává stížnosti na ministerstvo zdravotnictví, aby iniciovali revizi vládního nařízení o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, jak vyplývá ze Stanoviska k posouzení vlivů [25].

Výsledky mojí bakalářské práce potvrzují, že u magnetického pole vedení se hodnoty ani zdaleka nepřibližují limitům povoleným v nařízení vlády č. 1/2008 Sb. Referenční hodnota magnetické indukce je pro ostatní obyvatelstvo $B = 100 \mu\text{T}$ a maximální vypočtená hodnota indukce dosahuje přibližně $B = 2,3 \mu\text{T}$.

U elektrického pole vedení 400 kV dochází k překročení limitů pro ostatní obyvatelstvo, které jsou $E = 5000 \text{ V/m}$ a hraničí s referenční hodnotou pro zaměstnance, která je $E = 10000 \text{ V/m}$. Z toho vyplývá, že by tato místa měla být označena výstrahou upozorňující fyzické osoby používající kardiostimulátor na možné riziko, jak se uvádí v nařízení vlády č. 1/2008 Sb. U elektrického pole vedení 110 kV nebyly referenční hodnoty překročeny.

Z vlastní zkušenosti vím, že i když hodnoty elektromagnetického pole a indukovaného proudu nepřekračovaly normu, tak subjektivní pocity na lidské tělo byly značně nepříjemné. Jiskrový výboj, který vznikal při přiblížení ruky ke kovovým částem deštníku, byl silně bolestivý (jiskrový výboj dosahoval délky až 1,5 cm). Tento výboj není pro lidské tělo přímo nebezpečný, ale nepřímo může někdy způsobit i zranění. Příkladem je cyklista projíždějící pod vedením velmi vysokého napětí. Nepříjemné jiskření mezi kovovou konstrukcí kola a tělem cyklisty může vést k odvedení pozornosti při jízdě a následnému úrazu.

Při reálných měřeních jsem naměřil proud $200 \mu\text{A}$ (při držení rukojeti deštníku ve 2 metrech nad zemí). Dle ČSN 33 2040, proud procházející lidským tělem při pobytu v elektrickém poli, nesmí být větší než 3,5 mA. Tato podmínka byla splněna.

Měření proudu indukovaného elektrickým polem prokázalo, že krátkodobý pohyb pod vedením velmi vysokého napětí (při dodržení všech bezpečnostních zásad), nemá z tohoto hlediska vliv na lidské zdraví.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PROCHÁZKA, Radek. Venkovní vedení VVN (I): Úvod do problematiky přenosové soustavy. *TZB-info* [online]. 21.5.2007 [cit. 2012-03-04]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4142-venkovni-vedeni-vvn-i>
- [2] Výstavba přenosové soustavy: Výstavba nového vedení. ČEPS,a.s. *ČEPS,a.s.* [online]. 2011 [cit. 2012-02-25]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Documents/Vystavba%20přenosové%20soustavy%20WEB.pdf>
- [3] PROCHÁZKA, Radek. Stožáry VVN (III): Konstrukční řešení stožárů. *TZB-info* [online]. 18.6.2007 [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4192-stozary-vvn-iii>
- [4] MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2008, 168 s. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [5] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav* [online]. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. [cit. 2012-04-29]. ISBN 978-80-01-04935-8. Dostupné z: http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf
- [6] IVÁNEK, Lubomír. *Elektromagnetismus*. Ostrava, 2007, 173 s. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/EMag/Elektromagnetismus.pdf>
- [7] GARLÍK, Bohumír. Prostředí budov a vliv elektrických a elektromagnetických polí na zdraví: Interakce elektromagnetického pole a lidského organismu. *Časopis stavebnictví: časopis stavebních inženýrů, techniků a podnikatelů* [online]. Brno: EXPO DATA, 11-12/10 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/prostredi-budov-a-vliv-elektrickyh-a-elektromagnetickyh-poli-na-zdravi_N3901
- [8] PEKÁREK, Luděk. Zdraví a mobilní telefony. *Státní zdravotní ústav* [online]. 31. říjen 2007 [cit. 2012-02-28]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/zdravi-a-mobilni-telefony>
- [9] Česká republika. Nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. In: *1/2008 Sb. 2008*. Dostupné z: <http://portal.gov.cz/app/zakony/zakonPar.jsp?page=0&idBiblio=65732&nr=1~2F2008&rpp=15>
- [10] ČSN 33 2040. *Elektrotechnické předpisy. Ochrana před účinky elektromagnetického pole 50 Hz v pásmu vlivu zařízení elektrizační soustavy*. Praha: Centrum služeb pro normalizaci, 02/1993.
- [11] Náhled normy ČSN 33 2040. *Technor* [online]. 1993 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled_normy.php?norma=332040-csn-33-2040&kat=28579
- [12] JELÍNEK, Lukáš a Luděk PEKÁREK. Informace č. 16/2009 NRL pro neionizující elektromagnetická pole a záření: Elektromagnetické pole (0 Hz – 300 GHz) – stav k 1. lednu 2009. *Státní zdravotní ústav* [online]. 2009 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/cpl/NRL_Eletromag/NRL_16.pdf
- [13] JELÍNEK, Lukáš a Luděk PEKÁREK. Informace č. 17/2011 NRL pro neionizující elektromagnetická pole a záření: K zařazení elektromagnetického pole do kategorie 2B karcinogenů. *Státní zdravotní ústav* [online]. 2009 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/NwqRL_17.pdf

- [14] RAJZOVÁ, Jana. *Problematika rušení od venkovních vedení a vysokonapěťových zařízení*. Plzeň, 2009. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky. Vedoucí práce Ing. Eva Müllerová, Ph.D.
- [15] EYER, David. Zdravé bydlení a elektromagnetická pole. *Můj dům: Interiér, byt, zahrada, stavba, exteriér* [online]. Praha: BertelsmannSpringer, 2004, 10/2004 [cit. 2012-01-28]. ISSN 1210-7654. Dostupné z: http://www.arc.cz/dokumenty/md10_elektrosmog.pdf
- [16] Inženýrské sítě, téma 5: 5. Specifika rozvodu elektrické energie a řešení průtoků energie v elektrických rozvodech. *InNET Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava* [online]. 2009 [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~kod31/vyuka/inzsit/InzSite05%20Elektro.pdf>
- [17] TYRBACH, Jaromír. Ferrantiho jev, vlnová impedance a přirozený výkon vedení: Vlnová impedance a přirozený výkon vedení. *Internet Services Telefónica Czech Republic, a.s.* [online]. 2008 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: [Dostupné z: http://web.telecom.cz/tyrbach/Ferrantiho_jev.pdf](http://web.telecom.cz/tyrbach/Ferrantiho_jev.pdf)
- [18] MAYER, Daniel. *Elektrodynamika v energetice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 278 s. ISBN 80-730-0164-0.
- [19] ŠTROBLOVÁ, Milada. *Elektroenergetika: podklady pro cvičení*. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity. ISBN 80-7082-464-6.
- [20] KUBÍN, Miroslav. *Přenosy elektrické energie ČR: v kontextu evropského vývoje*. Praha: ČEPS, 2005, 567 s.
- [21] ČSN EN 50341-1. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV-Část 1: Všeobecné požadavky - Společné specifikace*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [22] MERTLOVÁ, Jiřina a Martin KOČMICH. *Elektrické stanice a vedení*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994, 169 s. ISBN 80-708-2155-8.
- [23] MEDUNA, Vladimír a Ctirad KOUDELKA. *Účinky elektrického proudu na lidský organismus*. Vysoká škola báňská [online]. Ostrava, březen 2006 [cit. 2012-05-30]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/pred_ZEP/Ucinky%20el.%20proudu.pdf
- [24] Agros2d. *Agros2d* [online]. 2012 [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: <http://www.agros2d.org/>
- [25] HONOVÁ, Jaroslava. Stanovisko k posouzení vlivů provedení záměru na životní prostředí. *Panenský Týnec* [online]. Praha, 27. 5. 2011 [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: [http://www.panenskytynec.cz/dokumenty/STANOVISKO\(0aEYrV\).pdf](http://www.panenskytynec.cz/dokumenty/STANOVISKO(0aEYrV).pdf)

Přílohy

Tab. č. 1 – Modifikovaná proudová hustota (převzato z [9])

Modifikovaná indukovaná proudová hustota J_{mod}^* – nejvyšší přípustné hodnoty			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	J_{mod} [$A \cdot m^{-2}$]	frekvence f [Hz]	J_{mod} [$A \cdot m^{-2}$]
300 - 10^7	$\sqrt{2} \cdot 0.01^a$	0 - 10^7	pětkrát nižší než nejvyšší přípustná hodnota pro zaměstnance

Tab. č. 2 – Měrný absorbovaný výkon (převzato z [9])

Měrný absorbovaný výkon (SAR) ^{b)} - nejvyšší přípustné hodnoty			
Platí pro frekvence od 100000 Hz do 10^{10} Hz	Měrný absorbovaný výkon - SAR - průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a celé tělo	SAR průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g ^{a)} tkáně s výjimkou rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	SAR průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g ^{a)} tkáně rukou, zápěstí, chodidel a kotníků
zaměstnanci	0,4 W/kg	10 W/kg	20 W/kg
ostatní osoby	0,08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg

a) 10 g tkáně uvedené v tabulce č. 2 je třeba volit ve tvaru krychle, nikoli jako plochý útvar na povrchu těla. [9]

b) Pro expozici osob pulsům kratším než 30 μs při frekvenci 300 MHz až 10 GHz se doporučuje zavést dodatečné omezení 10 mJ/kg průměrovaných pro 10 g tkáně pro měrnou absorbovanou energii. [9]

Tab. č. 3 – Hustota zářivého toku S (převzato z [9])

Hustota zářivého toku S^* – nejvyšší přípustné hodnoty			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	S [$W \cdot m^{-2}$]	frekvence f [Hz]	S [$W \cdot m^{-2}$]
$> 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	50	$> 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	10

Tab. č. 4 – Referenční úrovně elektrického pole E – nepřetržitá expozice (převzato z [9])

Referenční úrovně intenzity elektrického pole E – nepřetržitá expozice			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	E [V.m ⁻¹]	frekvence f [Hz]	E [V.m ⁻¹]
< 1	– ^{a)}	< 1	– ^{a)}
1 – 8	20000	1 – 8	10000
8 – 25	20000	8 – 25	10000
25 – 820	$5 \cdot 10^5 / f$	25 – 800	$2,5 \cdot 10^5 / f$
50	10000	50	5000
820 – $3 \cdot 10^3$	610	800 – $3 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^5 / f$
$3 \cdot 10^3$ – $65 \cdot 10^3$	610	$3 \cdot 10^3$ – $150 \cdot 10^3$	87
$65 \cdot 10^3$ – 10^6	610	$150 \cdot 10^3$ – 10^6	87
10^6 – 10^7	$610 \cdot 10^6 / f$	10^6 – 10^7	$87 \cdot 10^3 / f^{0,5}$
10^7 – $4 \cdot 10^8$	61	10^7 – $4 \cdot 10^8$	28
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{-3} \cdot f^{0,5}$	$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$1,375 \cdot 10^{-3} \cdot f^{0,5}$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	137	$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	61

a) Referenční úroveň pro statické elektrické pole není zavedena; při pobytu v silném statickém elektrickém poli je však třeba snížit vliv nepříjemného pocitu způsobeného elektrickým nábojem indukovaným na povrchu těla a zabránit sršení výbojů z povrchu těla. [9]

Tab. č. 5 – Referenční úrovně pro magnetickou indukci B – nepřetržitá expozice (převzato z [9])

Referenční úrovně pro magnetickou indukci B – nepřetržitá expozice			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	B [T]	frekvence f [Hz]	B [T]
< 1	0,28 *	< 1	0,056 *
1 – 8	$0,2 / f^2$	1 – 8	$0,04 / f^2$
8 – 25	$0,025 / f$	8 – 25	$0,005 / f$
25 – 820	$25 \cdot 10^{-3} / f$	25 – 800	$0,005 / f$
50	$500 \cdot 10^{-6}$	50	$100 \cdot 10^{-6}$
820 – $3 \cdot 10^3$	$30,7 \cdot 10^{-6}$	800 – $3 \cdot 10^3$	$6,25 \cdot 10^{-6}$
$3 \cdot 10^3$ – $65 \cdot 10^3$	$30,7 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^3$ – $150 \cdot 10^3$	$6,25 \cdot 10^{-6}$
$65 \cdot 10^3$ – 10^6	$2 / f$	$150 \cdot 10^3$ – 10^6	$0,92 / f$
10^6 – 10^7	$2 / f$	10^6 – 10^7	$0,92 / f$
10^7 – $4 \cdot 10^8$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	10^7 – $4 \cdot 10^8$	$0,092 \cdot 10^{-6}$
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$10^{-11} \cdot f^{0,5}$	$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^{-12} \cdot f^{0,5}$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	$0,20 \cdot 10^{-6}$