# :::: **S T U**

## Ing. Matej Cenký

Autoreferát dizertačnej práce

## Parametre vonkajších silových vedení

na získanie akademického titulu ("doktor" ("philosophiae doctor", v skratke "PhD.")

V doktorandskom študijnom programe: V študijnom odbore: **Elektroenergetika** 5.2.30 Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 31.7.2018

#### SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

## Ing. Matej Cenký

Autoreferát dizertačnej práce

## Parametre vonkajších silových vedení

na získanie akademického titulu (,,doktor" (,,philosophiae doctor", v skratke ,,PhD.")

V doktorandskom študijnom programe: Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 31.7.2018

## Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme dotorandského štúdia.

Na	Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenská technická univerzita v Bratislave
Predkladateľ:	<b>Ing. Matej Cenký</b> Slovenská technická univerzita v Bratislave Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Školiteľ:	<b>Doc. Ing. Žaneta Eleschová, PhD.</b> Slovenská technická univerzita v Bratislave Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Oponenti:	<b>prof. Ing. Juraj Altus, PhD.</b> Žilinská univerzita v Žiline Elektrotechnická fakulta Katedra výkonových elektrotechnických systémov Univerzitná 1, 010 26 Žilina
	Ing. Jozef Lago, PhD.
Autoreferát bol 1	ozoslaný
Obhajoba dizerta	ačnej práce sa koná: o hod
Na	Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenská technická univerzita v Bratislave Ilkovičova 3, miestnosť: C-417

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec

dekan fakulty

# Obsah

Úv	od		1
Ci	ele pr Tézy	<b>ráce</b> y dizertačnej práce	<b>2</b> 2
1	<b>Súča</b> 1.1 1.2	asný stav v oblasti výpočtu elektrických parametrov vonkajšich vedeni Impedancia	<b>3</b> 3 7
2	<b>Vyt</b> v 2.1 2.2	vorený softvér na výpočet elektrických parametrov Verifikácia softvéru	<b>10</b> 10 12
3	<b>Citli</b> 3.1 3.2 3.3	ivostná analýza vplyvu vstupných údajov na elektrické parametre Citlivostná analýza metódou jednotnej hĺbky prúdu v zemi	<b>19</b> 20 23 27
4	<b>Elek</b> 4.1 4.2	<b>Atromagnetické polia a elektrické parametre vedení</b> Aproximácie pri výpočtoch elektromagnetických polí	<b>29</b> 29 29
Pr	ínosy	pre prax	32
Zá	ver		33
Lit	terati	íra	36
Zo	znan	n publikácií autora	37

# Úvod

Elektrické parametre vonkajších elektrických vedení je problematika v elektroenergetike, ktorá bola prvý krát úspešne zmapovaná pred viac ako 90-timi rokmi, a ktorej riešenia sa odvtedy stále vyvíjajú. Táto práca zahŕňa doteraz známe výpočtové metódy elektrických parametrov VEV, ktoré boli implementované do nadstavby softvéru EMFTsim, čím vznikol najkomplexnejší výpočtový program v danej oblasti. Pomocou neho, a iných naprogramovaných nástrojov v jazyku Visual Basic, sú v práci realizované citlivostné analýzy nepresnosti vstupných veličín do výpočtu. V práci sú skúmané vplyvy prostredia, ktoré menia hodnoty permitivity a permeability v blízkom okolí vedenia, čim majú potenciál ovplyvniť výsledné elektrické parametre linky. Takéto vplyvy nie sú v praxi brané do úvahy, no tu sú vyčíslené a vyhodnotené. Zo záverov je možné posúdiť značnú opodstatnenosť zanedbávania jednotlivých vonkajších vplyvov. Najpoužívanejšia metodika výpočtu, ktorá uvažuje jednotnú návratovú hĺbku prúdu v zemi, bola použitá na výpočet elektrických parametrov reálnych vonkajších elektrických vedení a výsledky boli porovnané s nameranými hodnotami na týchto vedeniach. Rozdiely medzi nameranými a vypočítanými elektrickými parametrami boli vyhodnotené. Pomocou naprogramovaných makier v jazyku Visual Basic boli realizované kompletné výpočty touto metodikou, rovnako ako triedenie vstupných údajov z prehľadných súpisov VEV.

Nepresnosti, či neznalosti niektorých častí vedenia v praxi boli vyhodnotené na praktických príkladoch aj s grafickými reprezentáciami, použitím všetkých výpočtových metód. Softvér EMFTsim s implementovanou nadstavbou výpočtov elektrických parametrov zvláda komplexné analýzy zmeny vstupných veličín do výpočtu, simulácie terénu pod vedením v 3D, použitie neobmedzeného počtu a druhu fázových vodičov aj zemných lán, použitie rôznych stožiarov v rozpätí rovnako ako aj výpočet pomocou tvaru reť azovky a nie dokonalo priameho vodiča.

Poslednou časť ou práce je rozbor fyzikálneho základu elektromagnetických polí a elektrických parametrov vedení, ktorý definuje teoretické použitie meracích prístrojov elektromagnetických polí ako nástroj pre získavanie hodnôt parametrov vedení. Nová navrhnutá metodika je analyzovaná a boli definované faktory na získané elektrické parametre touto cestou.

# Ciele práce

Cieľ om práce je zhrnutie známych výpočtových metód elektrických parametrov, a ich softvérová implementácia, ktorá bude zároveň zahŕňať možnosti citlivostných analýz vstupných veličín do výpočtu na výsledné elektrické parametre, reálne modelovanie terénu pod vedením, či výpočet podľ a reť azovky preveseného vodiča. Zároveň sú analyzované vplyvy prostredia na elektrické parametre, z ktorých je možné určiť hraničné hodnoty výsledných parametrov.

Vplyv nepresnosti a neúplnosti vstupných údajov pre projektované alebo prevádzkované vedenia je vyhodnotený pomocou naprogramovanej nadstavby softvéru EMFTsim. Možný rozptyl výsledných elektrických parametrov je prezentovaný na konkrétnych príkladoch neúplnosti vstupných údajov v projektantskej praxi.

Rozbor spoločného fyzikálneho základu elektromagnetických polí a elektrických parametrov vedení bol použitý ako základ, pre posúdenie reálnej aplikácie získavania elektrických parametrov pomocou meraní elektromagnetických polí v okolí vedenia. Sú definované faktory vplývajúce na elektrické parametre v prípade využitia navrhovanej metodiky ich získavania.

Na naplnenie týchto cieľ ov sú stanovené nasledujúce tézy dizertačnej práce:

## Tézy dizertačnej práce

- 1. Teoretický rozbor metód výpočtu elektrických parametrov vonkajších silových vedení
- 2. Vplyv faktorov ovplyvňujúcich presnosť výpočtu elektrických parametrov vedení
- 3. Definovanie hraníc vstupných veličín pre presnosť výpočtu zjednodušenou metódou
- 4. Definovanie vplyvu presnosti a úplnosti vstupných údajov o vedení na presnosť výpočtu elektrických parametrov
- 5. Definovanie faktorov vplývajúcich na veľkosť elektrických parametrov vedenia na základe nameraných veličín elektrického a magnetického poľ a vytvoreného vedením

# 1 Súčasný stav v oblasti výpočtu elektrických parametrov vonkajšich vedeni

Pod pojmom elektrické vedenia sa rozumie impedancia  $(\overline{Z})$  a admitancia  $(\overline{Y})$  vedenia. Výpočty parametrov VEV sa vyvíjali až dnešného stavu, kedy sú dispozícii skrátené praktické formuly na ich výpočet. Ich hlavnou výhodou je rýchlosť a jednoduchosť. Pri tomto druhu výpočtov nie je potrebné používať maticové výpočty ani transformácie do zložkových sústav, nakoľko predpokladáme ideálne podmienky, čo sa týka transpozície (symetrie) vedení. Spomenuté podmienky nie sú takmer nikdy splnené, čo vnáša do výpočtu chybu hneď na začiatku procesu. Zároveň je táto metodika odvodená z maticových tvarov metódy jednotnej návratovej hĺbky prúdu v zemi, ktorá je opísaná v tejto kapitole. Preto sa týmito skrátenými formulami zaoberať nebudem, a ich reprezentáciou bude spomínaná metóda jednotnej návratovej hĺbky prúdu v zemi v kombinácii s transformáciou na zložkové sústavy. Nasledujúca podkapitola sa venuje výpočtovým metódam impedancie VEV v chronologickom poradí podľa ich vzniku.

## 1.1 Impedancia

Impedancia -  $\overline{Z}$  - je komplexná veličina. Jej reálna zložka sa nazýva rezistancia - (R) a imaginárna zložka reaktancia - (X). Časti impedancie - vlastná impedancia (hodnoty na diagonále impedančnej matice) definuje impedanciu vodiča a vzájomná impedancia (hodnoty mimo diagonály v impedančnej matici) definuje impedanciu medzi dvoma vodičmi. Zemné laná sa zaraďujú v maticovom zápise na krajné polohy, vo vzťahu 1.2 označené ako g a g'.

$$\overline{Z} = R + j\omega L = R + jX \left[\Omega\right] \tag{1.1}$$

$$[\overline{Z}] = \begin{bmatrix} \overline{Z}_{11} & \overline{Z}_{12} & \overline{Z}_{13} & \overline{Z}_{1g} & \overline{Z}_{1g'} \\ \overline{Z}_{21} & \overline{Z}_{22} & \overline{Z}_{23} & \overline{Z}_{2g} & \overline{Z}_{2g'} \\ \overline{Z}_{31} & \overline{Z}_{32} & \overline{Z}_{33} & \overline{Z}_{3g} & \overline{Z}_{3g'} \\ \overline{Z}_{g1} & \overline{Z}_{g2} & \overline{Z}_{g3} & \overline{Z}_{gg} & \overline{Z}_{gg'} \\ \overline{Z}_{g'1} & \overline{Z}_{g'2} & \overline{Z}_{g'3} & \overline{Z}_{g'g} & \overline{Z}_{g'g'} \end{bmatrix}$$
(1.2)

Rezistancia je odpor vodiča, cez ktorý preteká prúd. V katalógu sa nachádza často len hodnota pre jednosmerný odpor, ktorý je možné skorigovať na hodnotu striedavú. Reaktancia sa dá rozpísať ako súčin uhlovej rýchlosti ( $\omega$ ) a indukčnosti (L). Vo výpočte indukčnosti sa nachádza množstvo rozličných výpočtových metód, od prvotných rovníc Carsona v roku 1926, cez výpočty ktoré uvažujú s komplexnou návratovou hĺbkou prúdu v pomyselnom vodiči, až po zjednodušenia pôvodných ideí a princípov.

#### 1.1.1 Rezistancia

Všeobecne sa rezistancia vodičov vypočíta podľa 1.3. Rezistivitu  $\rho_0$  [ $\Omega m$ ] ovplyvňue hlavne teplota vodiča. Pomocou teplotných súčiniteľ ov odporu sa dá tento vplyv zahrnúť do výpočtov.

$$R = \rho_0 \frac{l}{S} \qquad [\Omega] \tag{1.3}$$

V praxi sa na VEV používajú takmer výhradne AlFe vodiče (zložené vodiče z vrstiev hliníkových prútov v obale vodiča a oceľových prútov v jadre vodiča). Tým pádom spadajú do úvahy aj odchýlky spôsobené krútením lán, odchýlky od menovitého prierezu či nerovnomernosť prierezu vodiča a spojky. Reálne sa však uvažuje len vplyv teploty a skinefektu. Ostatné vplyvy sú zahrnuté v tabuľ kách príslušných noriem STN a IEC [1].

**Rezistancia pôdy** Pri aproximovanej metóde výpočtu impedancie vonkajších elektrických vedení sa uvažuje s jednotnou návratovou hĺbkou spätnej prúdovej cesty cez zem. Je preto potrebné určiť odpor tejto cesty <sup>1</sup>. Podľa [2] a [1] je postup nasledovný:

$$R_g = \frac{\omega\mu_0}{8} = \pi^2 f.10^{-4} \qquad [\Omega/km]$$
(1.4)

**Jednosmerný odpor** Jednosmerný odpor  $R_{DC}$  vodiča je závislý od rezistivity materiálov  $\rho[\Omega m]$  z ktorých je zložený, uvažovanej teploty okolia, jeho prierezu  $A[m^2]$  a strednej uvažovanej teploty vodiča  $T_{avg}[^{\circ}C]$ . Rezistivita materiálu sa všeobecne určí pri strednej teplote vodiča ako:

$$\rho = \rho_{20} [1 + \alpha_{20} (T_{avg} - 20) + \zeta_{20} (T_{avg} - 20)^2]$$
(1.5)

Kde:

- $\alpha_{20} [1/K]$  lineárny teplotný koeficient pri 20°C
- $\zeta_{20} [1/K^2]$  kvadratický teplotný koeficient pri 20°C

**Striedavý odpor - korekcia skinefektu** Pri prechode striedavého prúdu vodičom nastáva jav známy ako "skinefekt". Štandardný jednosmerný odpor vodiča uvažuje homogénne rozloženie prúdu, a teda hustota prúdu je v každom bode prierezu vodivej vrstvy vodiča rovnaká. Skinefekt spôsobuje vytláčanie prúdu na povrch vodičov, čim zvyšuje ich reálny odpor pri prechode striedavého prúdu.

Podrobné riešenie problému striedavého odporu je riešenie pomocou Besselových funkcií, a určenia rozloženia hustoty prúdu vo vodiči [3]. Riešenie zahŕňa komplikovaný matematický proces a operácie s nekonečnými radmi (vzniknutých z Besselových funkcií). Preto bolo pre zjednodušenie navrhnutých viacero aproximácií nekonečných radov, pri zachovaní čo najvyššej presnosti pri celom frekvenčnom spektre.

Vhodnou alternatívou je výpočet, ktorý je popísaný v technickej brožúre č.601 CIGRÉ pracovnej skupiny B2.43 [4]. Pre korekciu skinefektu je definovaný faktor  $k_{sk}$ , ktorý vyjadruje pomer medzi striedavým a jednosmerným odporom. Korekčný činiteľ  $k_{sk}$  sa vypočíta pre vodič celohliníkový (plný - index "full"), resp. pre vodič typu AlFe (dutý - index "tube").

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Pri sieť ovej frekvencii  $f = 50 \ Hz$  bude odpor spätnej prúdovej cesty  $R_q = 49, 3 \ [m\Omega km^{-1}]$ 

#### 1.1.2 Indukčnosť

V okolí každého vodiča pod prúdom sa vytvára magnetické pole, ktorého siločiary obkolesia vodič v tvare kruhov. Magnetické pole jeho časovou zmenou pôsobí na vodič samotný, aj na ostatné vodiče v systéme. Výsledná indukčnosť je vlastná a vzájomná indukčnosť, všeobecne v maticovej podobe. Vlastná indukčnosť sa nachádza na diagonále matíc (štvorcových - rozmerovo definovaných počtom vodičov), a vyjadruje pôsobenie magnetického poľ a vodiča na samého seba. Mimo diagonály sa nachádzajú vzájomné indukčnosti, ktoré vyjadrujú magnetickú väzbu medzi jednotlivými vodičmi v elektrickom systéme. Symetricky platí, že nezáleží na poradí indexovania vzájomných indukčností, hodnota bude vždy rovnaká ( $L_{13} = L_{31}$  a podobne). Bližšie fyzikálne pozadie možno nájsť napríklad v [5].

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{11'} & L_{12'} & L_{13'} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{21'} & L_{22'} & L_{23'} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{31'} & L_{32'} & L_{33'} \\ L_{1'1} & L_{1'2} & L_{1'3} & L_{1'1'} & L_{1'2'} & L_{1'3'} \\ L_{2'1} & L_{2'2} & L_{2'3} & L_{2'1'} & L_{2'2'} & L_{2'3'} \\ L_{3'1} & L_{3'2} & L_{3'3} & L_{3'1'} & L_{3'2'} & L_{3'3'} \end{bmatrix} [H]$$
(1.6)

**Geometrický stredný polomer vodiča** Pri exaktnom výpočte vlastnej indukčnosti zložených vodičov je potrebné poznať čo najpresnejšie stavbu vyšetrovaného vodiča. Vlastnosti vyplývajúce z konštrukcie zloženého vodiča, pri uvážení skinefektu, vyjadruje GMR (Geometric Mean Radius) - polomer homogénneho vodiča, ktorý má rovnakú indukčnosť ako uvažovaný zložený vodič. Všeobecne pre GMR platí vzť ah 1.7.

$$GMR = \xi_{AlFe} r_{AlFe} [m] \tag{1.7}$$

Kde:

- $\xi_{AlFe}$  [-] parameter lana,  $\xi < 1$ , zohľ adňuje konštrukciu AlFe vodiča
- $r_{AlFe}[m]$  polomer AlFe vodiča

**Carsonove pôvodné rovnice** V roku 1926 J.R.Carson vo svojom článku "Wave Propagation in Overhead Lines With Ground Return" v časopise Bell System Technical Journal predstavil novátorskú myšlienku riešenia problematiky elektrických parametrov [6]. Vychádzal z predpokladu, že výkon (napätie aj prúd) sa po vedení šíri ako vlna a zem má uvažovanú presnú vodivosť. Rozvinutím týchto myšlienok dospel až k rovniciam, ktoré sú už na prvý pohľad dosť zložité a ich riešením je rozvinutie príslušných koeficientov v nich do nekonečného radu. Vyjadrujú výpočet impedancie ako takej, avšak ich hlavný prínos je pri výpočte indukčnosti.

Vlastná impedancia vodiča i je definovaná ako:

$$\overline{Z}_{ii} = R_{ii} + jX_{ii} + \overline{Z}_{g,ii} = R_{ii} + j\omega 2.10^{-4} \ln\left(\frac{2h_i}{\xi r_i}\right) + \overline{Z}_{g,ii}$$
(1.8)

$$\overline{Z}_{g,ii} = R_{g,ii} + jX_{g,ii} \tag{1.9}$$

Vzájomná impedancia vodičov i a k je definovaná ako:

$$\overline{Z}_{ij} = jX_{ik} + \overline{Z}_{g,ik} = j\omega 2.10^{-4} \ln\left(\frac{D_{ik'}}{D_{ik}}\right) + \overline{Z}_{g,ik}$$
(1.10)

$$\overline{Z}_{g,ik} = R_{g,ik} + jX_{g,ik} \tag{1.11}$$

Kde:

 $Z_a$ impedancia zeme rezistancia vodiča i  $R_{ii}$  $X_{ii}$ vlastná reaktancia vodiča i vzájomná reaktancia medzi vodičmi i a k $X_{ij}$ parameter lana:  $\xi = e^{\frac{-\mu_{r,vnut}}{4}}$ , kde  $\mu_{r,vnut}$  je relatívna permeabilita materiálu vodiča ξ permeabilita vákua:  $\mu_0 = 4\pi . 10^{-4} \left[ H/km \right]$  $\mu_0$ priemerná výška vodiča i nad terénom  $h_i$ polomer vodiča i  $r_i$ vzdialenosť vodičov *i* a *k*  $D_{ik}$ vzdialenosť vodiča i a obrazu vodiča k v zemi  $D_{ik'}$ 

**Metóda komplexnej hĺbky** Metóda komplexnej hĺbky, pod originálnym názvom CDER -The Complex Depth of Earth Return Model, uviedol C. Gary [7] 50 rokov po publikovaní Carsonových rovníc. Zároveň s ním ju rozvíjali aj Dubanton [8] a Deri [9]. Táto metóda mala byť alternatívou, ktorá predpokladá nahradenie zeme ako takej súborom imaginárnych vodičov (spätných prúdových ciest) umiestnených priamo pod reálnymi vodičmi linky so zarátaním ich komplexnej hĺbky.

$$D_{ik'} = \sqrt{(h_i + h_k + 2\overline{p})^2 + d_{ik}^2}$$
(1.12)

$$D_{ik} = \sqrt{(h_i - h_k)^2 + {d_{ik}}^2}$$
(1.13)

$$\overline{p} = \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu}} \tag{1.14}$$

Kde:

$\overline{p}$	komplexná hĺbka	[m]
$\rho$	rezistivita zeme	$[\Omega m]$
ω	uhlová rýchlosť	$[rads^{-1}]$
$\mu$	permeabilita zeme	$[Hm^{-1}]$

Vzťahy na výpočet impedancie podľa CDER metódy sú:

$$\overline{Z}_{ii} = R_{ii} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2(h_i + \overline{p})}{GMR_i}\right) = R_{AC} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2(h_i + \overline{p})}{\xi r}\right) \left[\Omega/km\right]$$
(1.15)

$$\overline{Z}_{ik} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{ik'}}{D_{ik}}\right) \left[\Omega/km\right]$$
(1.16)

**Rozšírená metóda komplexnej hĺbky** V roku 1996 vyšla na univerzite v Kyóte dizertačná práca, ktorá sa zaoberala okrem iného aj metódami výpočtu elektrických parametrov vonkajších vedení [12]. Autor T. Noda analyzoval aproximácie, ktoré realizovali Dubanton a kolektív vo výpočtovej metóde s konceptom komplexnej hĺbky. Sám následne navrhol aproximáciu pomocou exponenciálnej funkcie druhého stupňa, čo je o jeden stupeň vyššia ako pôvodne použitá.

Navrhované konečné vzťahy sú v matematicky komplikovanejšie, no presnejšie vzhľadom k štandardnej Carsonovej metóde.

$$\overline{Z}_{ii} = R_{AC} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ A \ln \frac{2(h+\alpha\overline{p})}{\xi r} + (1-A) \ln \frac{2(h+\beta\overline{p})}{\xi r} \right\}$$
(1.17)

$$\overline{Z}_{ik} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ A \ln \frac{\sqrt{(h_i + h_k + 2\alpha\overline{p})^2 + d_{ik}^2}}{\sqrt{(h_i - h_k)^2 + d_{ik}^2}} + (1 - A) \ln \frac{\sqrt{(h_i + h_k + 2\beta\overline{p})^2 + d_{ik}^2}}{\sqrt{(h_i - h_k)^2 + d_{ik}^2}} \right\}$$
(1.18)

kde  $A = 0, 131836; \alpha = 0, 26244; \beta = 1, 12385.$ 

**Metóda jednotnej návratovej hĺbky prúdu v zemi** Vychádzajúc zo vzťahu 1.1 sa počítajú v metóde jednotnej návratovej hĺbky prúdu v zemi zložky impedancie samostane. Po určení návratovej hĺbky a odčítaní potrebných vzdialeností sa vstupné údaje zasadia do vzťahov:

$$\overline{Z}_{ik} = R_{ik} + j\omega L_{ik} \qquad [\Omega/km] \tag{1.19}$$

$$R_{ii} = R_{AC} + R_g \qquad [\Omega/km] \tag{1.20}$$

$$R_{ik} = R_g \qquad [\Omega/km] \tag{1.21}$$

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_g}{\xi r} \qquad [H/km] \tag{1.22}$$

$$L_{ik} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_g}{D_{ik}} \qquad [H/km]$$
(1.23)

Kde:

$R_g$	odpor návratovej zemnej cesty prúdu	$[\Omega/km]$
$R_{AC}$	striedavý odpor vodiča	$[\Omega/km]$
$D_g$	hĺbka návratovej cesty prúdu v zemi	[m]
ξ	parameter lana	[—]

### 1.2 Admitancia

Priečna admitancia je počítaná pomocou potenciálových koeficientov (Maxwellove potenciálové koeficienty) - Kelvinovou metódou zrkadlenia [1], [13], [14].

$$\overline{Y} = G + jB = G + j\omega C \qquad [S/km] \tag{1.24}$$

- G[S] zvod (konduktancia) vyjadruje činné straty na vedení nezávislé na veľkosti preneseného výkonu
- C[F] kapacita vyjadruje vplyv elektrického poľa vo vodičoch na ich okolie

#### 1.2.1 Konduktancia

Konduktancia je elektrický parameter ťažko kvantifikovateľný, ktorý tvorí prechod zvodového prúdu cez povrch izolátorov z elektrického vedenia do zeme a koróna na vonkajších elektrických vedeniach.

**Zvodový prúd** izolátorov je spôsobený najmä nedokonalou čistotou izolátorov. Každá izolácia má merateľnú, aj keď len minimálnu, vodivosť. Pokiaľ označíme odpor izolácie  $R_i[\Omega]$ , vodivosť izolácie bude  $G = 1/R_i$  a zvodový prúd vedenia pri napätí  $U_f[V]$  voči zemi pre jeden vodič bude:

$$I_v = \frac{U_f}{R_i} = U_f G \quad [A] \tag{1.25}$$

Celkové straty na 3-fázovom vedení budú:

$$\Delta P_c = \frac{(\sqrt{3}U_f)^2}{R_i} 10^3 = \frac{U^2}{R_i} 10^3 \quad [kW]$$
(1.26)

**Koróna** z fyzikálnej definície znamená neúplný samostatný výboj, ktorý vzniká na hrotoch a silno zakrivených elektródach po prekročení počiatočného napätia. Koróna však predstavuje aj priečne straty na vedení, ktoré sú citlivé na lokálne meteorologické vplyvy. Je to zároveň hlavný parameter pre určenie priečnych strát na vonkajších elektrických vedeniach. Ak ide o hladký a čistý vodič, počiatočné napätie koróny je  $U_0$ . Existuje hrotová (svietiace body na nerovnostiach povrchu,  $U \ll U_0$ ) strímrová (menšie trsové výboje,  $U \ll U_0$ ) a lavínová (celkový obal okolo vodiča,  $U \ge U_0$ ) koróna.

Straty korónou sú však ovplyvnené povrchom vodiča a atmosférickými podmienkami (tlak, vlhkosť, teplota, hmla, dážď a iné). Samotná drsnosť vodiča a prítomnosť mastnoty vedia zvýšiť straty korónou niekoľ konásobne [15].

#### 1.2.2 Kapacita

Vplyvom premenlivého elektrického poľa vo vodiči sa indukujú prúdy nie len vo vyšetrovanom vodiči, ale aj v ostatných. Pre odvodenie kapacity vedenia sa využíva náhrada fiktívnym obvodom, v ktorom je zem (ako druhá elektróda) nahradená vodičom v zemi pod skutočným vodičom, v hĺbke rovnajúcej sa výške vodiča nad zemou. Tento princíp sa nazýva Kelvinova metóda zrkadlenia, a vieme ju použiť nezávisle na frekvencii, či materiálových konštantách vodiča a zeme. Všeobecný postup výpočtu kapacity vychádza zo vzťahu:

$$\begin{bmatrix} \overline{U}_1 \\ \overline{U}_2 \\ \overline{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{Q}_1 \\ \overline{Q}_2 \\ \overline{Q}_3 \end{bmatrix}$$
(1.27)

Kde:

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \ln \frac{2h_i}{r_i} \qquad [km/F]$$
(1.28)

$$p_{ik} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \ln \frac{D_{ik'}}{D_{ik}} \qquad [km/F]$$
(1.29)

- $\overline{U}[V]$  fázové napätie vodiča
- $p_{ii} [km/F]$  vlastný potenciálový koeficient
- $p_{ik} [km/F]$  vzájomný potenciálový koeficient
- $\overline{Q}\left[ C/km\right]$  náboj vodiča
- $\varepsilon_0 \, [Fm^{-1}]$  permitivita vákua
- $\varepsilon_r$  [-] relatívna permitivita prostredia
- $h_i[m]$  výška vodiča nad zemou
- $r_i[m]$  polomer vodiča
- $D_{ik}[m]$  vzdialenosť dvoch vodičov i a k
- $D_{ik'}[m]$  vzdialenosť vodiča i a obrazu vodiča k

Následným invertovaním matice [P] dostaneme maticu [C], čo je už matica kapacitných koeficientov daného systému [K] [16, 17] vo fázovom tvare. Platí vzťah:

$$\begin{bmatrix} \overline{Q}_1 \\ \overline{Q}_2 \\ \overline{Q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \overline{U}_1 \\ \overline{U}_2 \\ \overline{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{U}_1 \\ \overline{U}_2 \\ \overline{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{U}_1 \\ \overline{U}_2 \\ \overline{U}_3 \end{bmatrix}$$
(1.30)

Z kapacitných koeficientov sa pre 3-fázový systém vypočítajú kapacity vodičov voči zemi, a vzájomné kapacity medzi vodičmi ako:

$$C_x = \sum_{i=1}^{3} k_{xi}$$
(1.31)

$$C_{xy} = |k_{xy}| \tag{1.32}$$

Kde:

- $C_x \left[ F/km \right]$  kapacita vodiča x voči zemi
- $C_{xy} [F/km]$  vzájomná kapacita medzi vodičmi x a y

# 2 Vytvorený softvér na výpočet elektrických parametrov

Naprogramovaná nadstavba softvéru EMFTsim umožňuje výpočet elektrických parametrov VEV podľa všetkých výpočtových metód uvedených v práci a navyše zahŕňa tieto výhody:

- výpočet s terénom pod vedením (3D model)
- výpočet podľa reálnej reť azovky zaveseného vodiča
- nelimitovaný počet fázových vodičov
- nelimitovaný počet zemných lán
- použitie dvoch rôznych stožiarov na rozpätí
- viaceré možnosti grafických a textových výstupov
- automatická zmena vybraných vstupných parametrov do výpočtu možnosti analýz výsledných parametrov vedení
- editovateľ ná databáza vodičov

## 2.1 Verifikácia softvéru

Verifikácia výpočtového aparátu programu EMFTsim bola realizovaná porovnaním so softvérom Matlab Mathworks, v dvoch rôznych variantách. V prvom prípade boli porovnané výsledky z Matlabu so všetkými výpočtovými metódami pre najjednoduchšiu konfiguráciu vodičov, v druhom prípade sa porovnávala len Carsonova metóda výpočtu pre dvojsystémové vedenie so zemnými lanami. Verifikácia je vyhodnocovaná len pre impedanciu, nakoľ ko výpočet potenciálových koeficientov obsahoval už pôvodný softvér EMFTsim bez nadstavby, a bol verifikovaný napríklad aj s programom ANSYS Maxwell [18].

## 2.1.1 Dvojvodičová konfigurácia

Rezistivita zeme je 100  $\Omega m$ , jednosmerný odpor vodičov je 0,1181  $\Omega/km$  a frekvencia 50 Hz. Na tomto príklade vypočítaných matíc parametrov dvojvodičového systému sú ukázané rozdiely jednotlivých výpočtových metód, ako aj zásadný rozdiel uvažovania, a neuvažovania zeme vo výpočtoch (spravidla všetky metódy spred roku 1926).

<b>R</b> [Ω/km]	1	2	L [mH/km]	1	2
1	0,1663	0,0483	1	2,3254	1,1143
2	0,0483	0,1665	2	1,1143	2,3247

Tabul'ka 2.1: Carsonov	va originálna metóda
------------------------	----------------------

<b>R</b> [Ω/km]	1	2	L [mH/km]	1	2
1	0,1663	0,0483	1	2,3148	1,1143
2	0,0483	0,1665	2	1,1143	2,3140

Tabuľ ka 2.2: Referenčné hodnoty z Matlabu pre zvolenú konfiguráciu

Vypočítané hodnoty sú v maticovom tvare, v najvšeobecnejšom vyjadrení. Pri výpočte bez uváženia vplyvu zeme sú výsledné hodnoty odporu aj indukčnosti skreslené. Spomedzi ostatných metód sa javí najbližšie štandardnej Carsonovej rozšírená CDER metóda. Všetky spomenuté výpočtové metódy sú bližšie opísané v predchádzajúcej podkapitole. Referenčné hodnoty ktoré boli vypočítané programom Matlab sa v hodnotách rezistivity zhodujú maximálne s Carsonovou originálnou metodikou opísanou v práci, hodnoty indukčnosti sa líšia minimálne (rozdiel menší ako 0,05%).

### 2.1.2 Dvojsystémový stožiar s dvoma zemnými lanami

Na verifikáciu bol použitý dvojsystémový stožiar typu súdok. Najvyššia odchýlka nastala v súslednej rezistancii - 0,5%, ktorá bola spôsobená nie totožnou korekciou skinefektu v programe Matlab a EMFTsim. Matica rezistancií mala najvyššiu odchýlku od referenčných hodnôt 0,46%, zatiaľ čo matica indukčností mala najvyššiu odchýlku 0,21%. Rozdiely medzi oboma programami sú veľmi malé, považujem teda softvérovú nadstavbu EMFTsim na výpočet elektrických parametrov VEV za verifikovanú.

Tabuľka 2.3: Percentuálny rozdiel vypočítaných hodnôt rezistancií a indukčností softvérom EMFTsim a Matlabom

$\Delta R \ [\%]$								$\Delta L$	[%]		
0,463	0,000	0,155	0,324	0,182	0,093	0,144	0,190	0,153	0,214	0,198	0,171
0,000	0,306	0,094	0,182	0,124	0,063	0,190	0,149	0,175	0,198	0,199	0,179
0,155	0,094	0,281	0,093	0,063	0,095	0,153	0,175	0,130	0,171	0,181	0,180
0,324	0,182	0,093	0,463	0,000	0,155	0,214	0,198	0,171	0,144	0,190	0,153
0,182	0,124	0,063	0,000	0,306	0,094	0,198	0,199	0,181	0,190	0,149	0,175
0,093	0,063	0,095	0,155	0,094	0,281	0,171	0,179	0,180	0,153	0,175	0,137

## 2.1.3 Porovnanie s nameranými hodnotami

Súčasť ou práce je porovnanie reálne nameraných elektrických parametrov na vybraných vedeniach s vypočítanými elektrickými parametrami. Vypočítané hodnoty Impedancie boli realizované metódou s jednotnou návratovou hĺbkou prúdu v zemi, ako praktický príklad použitia najjednoduchších vzťahov. Pri výpočtoch boli vzaté do úvahy rôzne typy stožiarov (Donau, Mačka a.i.), rôzne výškové typizácie stožiarov, jednotná výška vodiča nad zemou 12m (stanovená ako priemerná výška na celom úseku z dôvodu dodržania hygienických limitov a križovaní s inými objektami), dokonalá transpozícia a samozrejme rôzne druhy použitých vodičov.

Výsledné porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt sa nachádza v tabuľ kách nižšie. Pri výpočte parametrov sa VEV uvažovali ako dokonalo transponované. Vedenie sú však nesymetrické, preto sa pri meraní uplatnil aj vplyv odporu zeme, ako aj zemných lán. Pri nulových zložkách parametrov VEV je vplyv zjednodušení viditeľ ný najviac.

#### Impedancia v súslednej zložke

Rozdiely medzi vypočítanými a nameranými hodnotami sú:

- Impedancia 2,05%
- Rezistancia 4,41%
- Indukčnosť 2,19%

#### Impedancia v nulovej zložke

Rozdiely medzi vypočítanými a nameranými hodnotami sú:

- Impedancia 4,38%
- Rezistancia 10,13%
- Indukčnosť 6,08%

#### Admitancia v súslednej zložke

Rozdiely medzi vypočítanými a nameranými hodnotami sú:

- Admitancia 3,91%
- Kapacita 3,91%
- Konduktancia neuvažovaná

Celkovo je vidno, že aj najjednoduchšou výpočtovou metódou možno dosiahnuť presné výsledky elektrických parametrov. Zároveň sa ukázali rozdiely od nameraných hodnôt hlavne pri nulových zložkách elektrických parametrov, kde veľkú rolu zohráva práve rezistivita zeme, umiestnenie zemného lana, či členitosť terénu. V týchto prípadoch vidíme, že tolerancia, ktorá bola určená pre jednotlivé parametre v tab. 2.6, platí aj pre tento prípad.

## 2.2 Faktory vplývajúce na presnosť výpočtu elektrických parametrov

Všetky nasledujúce faktory sú buď uvažované okrajovo, alebo vôbec neuvažované pri výpočte elektrických parametrov VEV. Sú to konkrétne klimatické zmeny, zanedbávanie stožiarov (z materiálového hľadiska) VEV, viac vrstvová zem (nejednotná rezistivita zeme), tečenie vodičov, korózia vodičov, hĺbka prúdu v zemi a vplyv terénu.

## 2.2.1 Vplyvy prostredia

Kapitola sa zaoberá lokálnymi vplyvmi prostredia na VEV a ukazuje význam jednotlivých faktorov, ktoré môžu ovplyvniť výsledné elektrické parametre VEV. Vedenie nie je uvažované ako celok, ale ako líniová stavba, ktorá môže prechádzať rôznymi stavmi po jej celej dĺžke. Kľ účovými parametrami sú v tomto prípade **permeabilita** prostredia a **permitivita** prostredia. **Zanedbanie stožiarov** V praxi sa uvažuje zanedbanie stožiarov vonkajších elektrických vedení. Tieto nosné konštrukcie sú postavené z ocele, ktorej permeabilita sa rovná približne dvojnásobku permeability vákua. Rozpätia vonkajších elektrických vedení ZVN sú v rozmedzí medzi 150-350 m, s tým, že stožiare v prenosovej sústave majú základňu aj 4m. V najhoršom prípade približne v 3% dĺžky vedenia bude potrebné počítať s inou hodnotou permeability ako na zvyšnom úseku. Je ť ažké určiť presnú hodnotu upravenej hodnoty permeability kvôli nehomogénnosti samotného skúmaného prostredia.

Ak sa zváži podmienku výskytu tejto odlišnej hodnoty na vedení (3% z celkovej dĺžky), vypočítať skutočný rozdiel vo výslednej hodnote vlastnej indukčnosti vodiča sa dá ako:

$$\Delta L_{kk} = \frac{|L_{kk1} - L_{kk1,3}|}{L_{kk1}} 100 = 0,8795 \,[\%]$$

Vzhľadom na to, že táto percentuálna odchýlka môže byť zanedbaná, aj vplyv na kapacitu bude veľmi malý, a vo všeobecných výpočtoch sa neuvažuje [19]. Kovy sa uvažujú s nekonečnou permitivitou. Je to kvôli tomu, že sú natoľko vodivé, že nijakým spôsobom nezabraňujú pôsobeniu elektrickému poľu - teda opačný prípad od vákua. Stožiare sú však prútovka, ktorá využíva materiálu čo najmenej, s cieľ om zachovať čo najvyššiu mechanickú pevnosť v požadovaných smeroch pôsobenia síl. Bližšie k téme pôsobenia stožiarov na elektrické polia v ich okolí sa zaoberá [20]. Vo výpočtoch elektrických parametrov sa tento vplyv nezohľadňuje.

**Lokálne klimatické extrémy** Klimatické podmienky sa môžu líšiť v rôznych častiach vedenia v rôznych časových intervaloch. Konkrétne sa kapitola zaoberá hlavne podmienkami ako dážď, mráz, hmla a slnečné počasie. Predpoklad je, že dážď nebude pôsobiť na zmenu teploty. Zostávajú dva vplyvy - zmena vlhkosti vzduchu a zmena vlhkosti pôdy. Vzduch ma materiálové vlastnosti, ktoré sa uvažujú ako totožné s materiálovými vlastnosť ami vákua. Keď sa tento systém naruší vodou, zmenia sa jeho vlastnosti. Zmena vlhkosti prostredia má malý vplyv výpočet kapacity či indukčnosti vedenia (permitivita: vodná para -  $\sim$ 1, voda -  $\sim$ 81; permeabilita voda - $\sim$ 0,99).

Zvlhnutie pôdy pri dlhotrvajúcich dažď och sa pri výpočte elektrických parametrov dá vziať jedine do úvahy ako zmena rezistivity pôdy v jej horných vrstvách, teda vplyv by sa prejavil hlavne v nulových zložkách indukčnosti a rezistancie. Nakoľ ko však neboli k dispozícii relevantné zdroje zmeny rezisitivity pôdy s vlhkosť ou, nebola táto analýza realizovaná.

Okrem ničivých občasných vetrov na Slovensku nehrozí časté kývanie vodičov, a už vôbec nie na relevantnej dĺžke vedenia. Kývanie by potencionálne spôsobilo nestálu vzdialenosť vodičov (čiže ovplyvnilo indukčnosť aj kapacitu vedenia) alebo v horšom prípade dotyk fáz. Treba podoknúť, že táto nerovnomernosť vzdialeností fáz vodičov sa dá efektívne odstrániť aj medzifázovými rozperkami.

#### 2.2.2 Rezistivita zeme

Pri výpočtoch sa uvažuje zem ako dokonale homogénna hmotu. Zem ale nie je čisto homogénna, ako to tento model predpokladá. Ako už bolo vyššie spomenuté, prúdová spätná cesta prechádza vo veľkej hĺbke, no spätne pôsobí na výslednú hodnotu impedancie cez všetky tieto vrstvy zeme [21].



Obr. 2.1: Model trojvrstvovej zeme pri výpočtoch impedancie VEV

Výsledná impedancia vypočítaná pri rôznych hodnotách rezistivity jednotlivých časti pôdy bola značne odlišná od tej, v ktorej bola použitá len homogénna zem. V najmenej priaznivom prípade sa odchýlka vzájomnej impedancie priblížila na hodnotu približne 20% pri 60 Hz. Je teda zrejmé, že pokiaľ je známe geologické podložie trasy VEV, je omnoho presnejšie použiť metódu viacerých vrstiev zeme, než klasickú výpočtovú metódu.

## 2.2.3 Starnutie vedení

Pri konštrukcii vedenia je potrebné vyhotoviť montážne tabuľky, ktoré určujú jednotlivé kotevné úseky VEV, a predikujú ich mechanické správanie v čase. Definujú sa počiatočné montážne tabuľky (čas montáže), prechodné montážne tabuľky (ľubovoľný čas medzi počiatočnými a konečnými tabuľkami) a konečné montážne tabuľky (zvyčajne 30 rokov od montáže). Je zrejmé, že vedenie prechádza určitým procesom starnutia, ktorého vplyv na parametre VEV je analyzovaný v nasledujúcej časti.

**Tečenie vodičov** Čím dlhšie vodič visí v rovnakých podmienkach, tým bude mať väčší priehyb, jedná sa o tečenie vodičov. V [22] autori poukazujú, že mechanické namáhanie vodičov je závislé od teploty okolia a prípadných preť ažení na vedení (napríklad námraza). To sa zhoduje aj s oficiálnym dokumentom pracovnej skupiny č.5 z medzinárodnej organizácie Cigré, ktorý bol uverejnený v časopise Electra v roku 1972 [23]. Na obr. 2.2 je vidieť príklad priebehu závislosti tečenia vodiča (reprezentovaného teplotným posunom) od doby prevádzkovania vodiča. Najvýraznejšie tečenie vodiča nastáva ihneď po inštalácii, do doby približne 3-5 rokov po montáži.



Obr. 2.2: Priebeh závislosti zmeny teploty  $\Delta T$  od času t pre AlFe 240/39 podľa teórie tečenia

Ukázali sa malé rozdiely pri potenciálových koeficientoch (0,3 - 1,3%) a zanedbateľ né pri impedancii (0,000 035 - 0,006%).

**Korózia vodičov** Z [24] vyplýva, že vodivosť lana sa behom svojej životnosti mení málo - približne 1,6% za 30 rokov. Menia sa mechanické parametre lana a problémom sa stávajú najmä poruchy pretrhnutím alebo porušením lana. Príspevok korózie k elektrickým parametrom VEV je teda na základe uvedenej štúdie nedôležitý. Detailne rozpracovaná je táto tématika v [24–27].

## 2.2.4 Hĺbka prúdu v zemi

Hĺbka prúdu v zemi je zahrnutie fyzikálneho správania sa magnetického poľa, ktoré vyžaruje vodič VEV vo vzduchu (uvažovaného ako vákua) a v zemi.

Rozborom pôvodných Carsonových rovníc o vzájomnej impedancii a aproximujemáciou nekonečných radov len prvými členmi (ako navrhuje napríklad [28]) sa dosiahne nasledovný vzťah:

$$D_{g\_Carson} = \left(\frac{1,85138}{1000\sqrt{5}\mu_0}\sqrt{\frac{\rho}{f}}\right) = 658,87147\sqrt{\frac{\rho}{f}} \,[m] \tag{2.1}$$

Metóda CDER, a rozšírená CDER metóda, majú odlišný prístup k tejto problematike, založený na novom pojme "komplexnej hĺbky", ktorý zjednodušuje celkový výpočet oproti pôvodným rovniciam. Zároveň zo vzť ahov pre výpočet impedancie metódy rovnakej hĺbky prúdu v zemi (Rovnica 1.19) je zrejmé, že sa zanedbáva výšku vodiča nad zemou, zatiaľ čo CDER metóda s ňou ráta v oboch prípadoch (vztť ah 1.16 a 1.16). Zaujímavé na tejto metóde je fakt, že komplexná hĺbka zároveň ovplyvňuje aj samotnú rezistanciu vedenia, keď že jej imaginárna časť sa pri výpočte prevráti do reálnej roviny.

## 2.2.5 Vplyv tvaru terénu

Uvažovať terén pri elektrických parametroch VEV nie je štandardom v žiadnej výpočtovej metóde - predpokladá sa rovný terén. Hornatý terén však výrazne ovplyvňuje reálne výšky vodičov nad terénom (obr. 2.3 a 2.4).



Obr. 2.3: Vedenie v nehornatom teréne



Obr. 2.4: Vedenie v hornatom teréne

Vplyvu tvaru terénu pod VEV bol ukázaný na dvoch alternatívach - zmena terénu v priečnom pohľade na os vedenia, a zmena terénu v pozdĺžnom pohľade na os vedenia.

**Terén priečny na os vedenia** Boli vypočítané elektrické parametre oboch systémov dvojsystémového stožiara, a následne porovnané hodnoty rezistancie, indukčnosti a kapacity s výpočtami pre nulový priečny sklon terénu. Terén bol uvažovaný ako pootočená rovina v osi stožiara od 0° do 60°- najvyššie rozdiely parametrov boli zaznamenané pri nulovej kapacite vedenia na prvom systéme, systéme ktorý sa približoval k terénu. V tomto prípade je rozdiel výsledných parametrov približne 11%. Správanie sa druhého systému pri výpočte kapacít ukazuje citlivosť Kelvinovej metódy zrkadlenia, ktorá počíta obrazy vodičov kolmo k terénu v zemi. Pri výpočte indukčnosti a rezistancie sú odchýlky od plochého terénu menšie, maximálne do približne 5%. Vo všeobecnosti platí, že najviac ovplyvňované boli nulové zložky elektrických parametrov.

**Terén pozdĺžny na os vedenia** Pozdĺžny terén bol modelovaný na rozpätí s dĺžkou 300 m a s postupne zvyšujúcim sa výškovým rozdielom medzi dvoma stožiarmi. Tieto stožiare sú rovnaké ako modelový stožiar v kapitole závislostí elektrických parametrov od vstupných premenných, jeden z nich s typizáciou N+12. Najvyšší výškový rozdiel v pozdĺžnom teréne bol uvažovaný rovnako 12m. Pri zmene výšky terénu na jednej strane bude vždy stožiar s typizáciou N+12 znížený o túto hodnotu výšky terénu aby v globále bolo udržané stále rovnaké rozpätie. Na obr. 2.6 sú graficky vyhodnotené najvýznamnejšie odchýlky elektrických parametrov, ktoré boli spôsobené neuvažovaním pozdĺžneho terénu pod vedením. Je vidno, že najväčší rozdiel je v nulovej zložke kapacity, no len na úrovni približne 2,5%.



Obr. 2.5: Znázornenie modelu pozdĺžneho terénu - svahu - pod vedením



Obr. 2.6: Odchýlky vybraných vypočítaných elektrických parametrov pri uvažovaní pozdĺžneho terénneho profilu

Druhý model pozdĺžneho terénu pod vedením bolo údolie v strede rozpätia s hĺbkou 5 m.



Obr. 2.7: Znázornenie modelu pozdĺžneho terénu - údolie - pod vedením

[%]	$\Delta \mathbf{R}$	$\Delta L$	$\Delta \mathbf{C}$
nulová zložka	0.395	0.129	4.256
súsledná zložka	0.000	0.000	0.162

Z tabuľky je vidno, že maximálnej nepresnosti je možné sa dopustiť na nulovej kapacite, v tomto prípade približne 4%, čo je minimálne 10-násobne viac ako ostatné sledované elektrické parametre, ktoré sa menia zanedbateľ ne. Poslednou alternatívou pre pozdĺžny terén, bol modelovaný terén s kopcom v strede rozpätia. Kopec má výšku 5 m, a rozdiely vo výpočtoch elektrických parametrov sú zobrazené v tabuľ ke nižšie.



Obr. 2.8: Znázornenie modelu pozdĺžneho terénu - kopca - pod vedením

Tabuľ ka 2.5: Percentuálne vyhodnotenie nepresnosti výpočtu pri modeli kopca v teréne

[%]	$\Delta \mathbf{R}$	$\Delta L$	$\Delta \mathbf{C}$
nulová zložka	0.618	0.197	10.786
súsledná zložka	0.000	0.000	0.671

Kde:

$$\Delta RLC = \frac{|RLC_{rovina} - RLC_{teren}|}{RLC_{rovina}}$$
(2.2)

#### 2.2.6 Zhrnutie vplyvu vonkajších faktorov na elektrické parametre

V projektantskej praxi nie je nikdy možné jednoznačne určiť všetky okrajové podmienky výpočtov elektrických parametrov, a niekedy je aj samotná stavba natoľko komplikovaná že by ju bolo nutné rozdeliť na veľmi veľké množstvo jednotlivých výpočtových úsekov. V tejto kapitole sú zhrnuté všetky podstatné vonkajšie vplyvy na elektrické parametre vonkajších elektrických vedení, ktoré v realite nie sú výnimkou.

V Tab.2.6 je vidno súhrn týchto vplyvov. Každý vonkajší vplyv bol vyhodnotený v tomto prípade pre nulovú a súslednú zložkovú sústavu. Najvýraznejší konečný rozptyl parametrov je zaznamenaný pri rozdieloch rezistivity zeme, kde sa môže reálna hodnota výsledných parametrov líšiť až o približne 14% v nulovej impedancii.

Tabuľ ka 2.6: Zhrnutie vplyvu vonkajších faktorov na elektrické parametre

	$\Delta R[\%] \qquad \Delta L[\%]$		$\Delta C$	[%]	noznámka		
	0	1	0	1	0	1	рознаніка
tečenie vodičov	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	po 30 rokoch
priečny terén	4,0	0,5	8,0	1,0	11,0	2,0	sklon 60 stupňov
pozdĺžny terén	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,0	rozdiel 12 m
hornatý terén	0,5	0,0	0,1	0,0	7,5	0,4	kopec / údolie priemer
viacvrstvová zem	14,0	5,0	14,0	5,0	0,0	0,0	najhorší zaznamenaný prípad

Všetky uvedené hodnoty v tabuľke sú prípady, ktoré ohraničujú maximálny rozptyl parametrov pri najmenej priaznivých podmienkach.

# **3** Citlivostná analýza vplyvu vstupných údajov na elektrické parametre

V tejto časti práce je vytvorená citlivostná analýza vplyvu vstupných údajov na elektrické parametre VEV. Motiváciou sú často nekompletné vstupné hodnoty do výpočtu elektrických parametrov v projektantskej praxi, prípadne možnosti analýzy už pri projekcii vedení. V prvej časti bude na analýzu použitá metóda s jednotnou návratovou hĺbkou prúdu v zemi, v druhej časti budú použité všetky výpočtové metódy uvedené v práci. V prvej časti je detailnejšie znázornená zmena výsledných parametrov pri použití viac zväzkových vodičov, či viac systémových vedení. V druhej časti sú zas okrem citlivostnej analýzy porovnávané jednotlivé výpočtové metódy medzi sebou. Na záver sú uvedené konkrétne prípady z projektantskej praxe, kedy je možné spraviť takúto analýzu efektívne pomocou naprogramovanej nadstavby EMFTsim. Ako modelový stožiar bol použitý súdok, s fázovými vodičmi typu AlFe 240/39 a zemným lanom AlFe 185/31. Všetky uvažované základné vstupné parametre sú uvedené v tab. 3.1.

priehyb fázového vodiča	$f_{mfv}$	6	[m]
priehyb zemného lana	$f_{mzl}$	6	[m]
priemer fázového vodiča	$d_{fv}$	21,75	[mm]
priemer zemného lana	$d_{zl}$	19,08	[mm]
merný odpor fázového vodiča	$R_{fv}$	0,1181	$[\Omega/km]$
merný odpor zemného lana	$R_{zl}$	0,1562	$[\Omega/km]$
krok zväzku	a	0,4	[m]
parameter lana	ξ	0,7788	[—]
rezistivita pôdy	$\rho$	100	$[\Omega.m]$
súradnice fázového vodiča 1(4)	$d_1$	2,7	[m]
	$h_1$	21,49	[m]
súradnice fázového vodiča 2(5)	$d_2$	3,5	[m]
	$h_2$	17,69	[m]
súradnice fázového vodiča 3(6)	$d_3$	2,7	[m]
	$h_3$	13,89	[m]
súradnice zemného lana	$d_{zl}$	0	[m]
	$h_{zl}$	27,6	[m]

Tabuľ ka 3.1: Základné vstupné hodnoty do citlivostnej analýzy

Rozmiestnenie fáz v rámci 3-fázového systému nemá v tomto prípade význam, keď že uvažujeme dokonalú transpozíciu po celej dĺžke vedenia. Samotné systémy boli uvažované tak, že na ľ avej strane (fázové vodiče 1-3) je umiestnený prvý systém a na pravej strane (fázové vodiče 4-6) je umiestnený druhý systém.

## 3.1 Citlivostná analýza metódou jednotnej hĺbky prúdu v zemi

Pre účely citlivostnej analýzy pomocou metódy jednotnej návratovej hĺbky prúdu v zemi bolo vytvorené makro v MS Excel, ktoré menilo zadanú vstupnú hodnotu a sledovalo zmenu na výstupných elektrických parametroch. Výsledky z tejto analýzy sú popísané a zobrazené graficky nižšie. V tejto časti budú analyzované zmeny rezistancie fázových vodičov aj zemných lán, zmeny priemeru fázového vodiča, zmeny rezistivity zeme, a vo vybraných prípadoch aj rozdiely jednoduchého a dvojsystémového vedenia v paralelnej prevádzke.

Označovanie legendy grafov je nasledovné: 0 - nulová zložka; 1 - súsledná zložka; zl - počet zemných lán; zv - počet vodičov vo zväzku; s - koľko systémový stožiar. Červené vertikálne prerušované čiary symbolizujú oblasť najčastejšie sa vyskytujúcich hodnôt vstupných parametrov.

**Zmena rezistancie fázových vodičov a zemných lán** Hodnota rezistancie vodičov sa mení jedine v prípade ich výmeny, čo sa v praxi deje pri rekonštrukciách, prestavbách, alebo výstavbe vedení. Fázové vodiče sú vyberané na základe ich elektrických a mechanických vlastností, čo poskytuje vždy viacero alternatív.

Na obr. 3.1 sú znázornené zmeny výslednej reaktancie a rezistancie vedenia od vstupnej hodnoty rezistancie zemného lana. Hlavný poznatok je, že zemné lano má vplyv len na nulovú reaktanciu a nulovú rezistanciu vedenia. Hodnoty reaktancie sa líšia ešte v závislosti od n-zväzkového vodiča a počtu systémov na vedení, zatiaľ čo hodnoty rezistancie sú ovplyvňované iba počtom systémov na stožiari.



Obr. 3.1: Zmena výslednej rezistancie a reaktancie vedenia pri zmene rezistancie zemných lán

**Zmena priemeru fázových vodičov** Ďalšie grafické spracovania sa týkajú zmeny priemeru fázového vodiča. Zmena priemeru fázového vodiča ovplyvnila viacero parametrov ako: nulová reaktancia, súsledná reaktancia, nulová susceptancia a súsledná susceptancia. Boli zaznamenané zmeny parametrov pri uvažovaní viacsystémového vedenia a zmene zväzkových vodičov - tieto vstupné hodnoty ovplyvňovali všetky spomenuté ovplyvňované parametre vo výsledkoch. Najväčšia zmena v súvislosti so zmeneným priemerov vodiča bola zaznamenaná pri súsledej reaktancii - parameter "X1 - 1zv - 1s").



Obr. 3.2: Zmena výslednej reaktancie dvojsystémového vedenia pri zmene priemeru fázových vodičov

**Zmena rezistivty zeme** V tejto časti bola analyzovaná zmena rezistancie zeme a jej vplyv na výsledné elektrické parametre vonkajších elektrických vedení. Táto téma je veľ mi aktuálna, nakoľ ko presnú rezistivitu zeme je veľ mi ť ažké určiť bez nákladného geologického merania, ktoré sa takmer nikdy nerealizujú, a používajú sa približné hodnoty pre danú pôdu pod linkou.

Na obr. 3.3 sa mení nulová reaktancia vedenia pre jeden systém a pre dvojsystémovú linku v logaritmickej mierke. Pri nesprávnom určení rezistivity zeme sa možno dopustiť značnej odchýlky - napríklad pri rezistivite pôdy 100 namiesto 1000  $\Omega.m$  by bola odchýlka nulovej reaktancie ~ 13% pre dvojsystém so zemným lanom. Ak by pri výpočtoch bolo zanedbané aj zemné lano, výsledky sa budú výrazne líšiť tiež. V grafoch je vidno aj využitie viac zväzkových vodičov, ktoré v tomto prípade neprispievajú významným podielom do konečných výsledkov reaktancie.



Obr. 3.3: Zmena výslednej nulovej reaktancie dvojsystémového vedenia pri zmene rezistivity pôdy



Obr. 3.4: Zmena výslednej rezistancie jednoduchého a dvojsystémového vedenia pri zmene rezistivity pôdy

Na poslednom grafe je zhodnotená nulová rezistancia vedenia, kde sa ukázalo, že pri zanedbaní zemného lana nie je rezistivita pôdy relevantná. Naopak, ak sa zemné lano uvažuje, rozdiel výskednej rezistancie nie je väčší ako približne 30% pri dvojsystémovom vedení. Je to spôsobené tým, že výpočtová metóda jednotnej návratovej hĺbky prúdu v zemi neuvažuje akúkoľ vek zmenu rezistancie pôdy aj napriek jej zmene rezistivity [1,2,29]. Metódy založené na princípe komplexnej hĺbky tento faktor zohľ adňujú.

## 3.2 Citlivostná analýza všetkými výpočtovými metódami

Okrem citlivostnej analýzy vstupných hodnôt, táto citlivostná analýza navyše porovnáva aj jednotlivé výpočtové metódy medzi sebou - ich výsledné elektrické parametre. Všetky grafické výstupy boli zhotovené pre dvojsystémovu paralelnú prevádzku s jednoduchým vodičom, nezachádza teda v tomto smere do takej hĺbky ako predchádzajúca analýza.

## 3.2.1 Zmena jednotkovej rezistancie zemných lán

Rovnako ako v prvej analýze, za prvý analyzovaný parameter bola zvolená jednotková rezistancia zemných lán, a to z toho dôvodu, že nie vždy je v praxi možné zistiť konkrétny typ alebo konkrétne parametre zemného lana, resp. kombinovaného zemného lana. Je teda relevantná otázka zaoberať sa možnou vstupujúcou chybou do výpočtu za takýchto predpokladov. Najvýraznejšie zmenený výstupný parameter pri aplikovaní rôznych hodnôt jednotkovej rezistancie zemného lana bola nulová rezistancia, kde rozdiel dvoch okrajových hodnôt dosahuje približne 100% (obr. 3.5). Boli vyhodnotené maximálne odchýlky, ktorých sa je možné dopustiť pri nekorektných vstupných údajoch jednotkovej rezistancie zemného lana. Parameter s najväčšou odchýlkou bola nulová rezistancia, kde sa rozdiel dvoch limitných hodnôt blížil k 130%. Pri nulovej indukčnosti tento rozdiel tvoril približne 77% v najnepriaznivejšom prípade.



Obr. 3.5: Zmena výslednej nulovej rezistancie vedenia pri zmene rezistancie zemných lán - platné všeobecne pre všetky metódy

## 3.2.2 Zmena rezistivity zeme

Ako jeden z najmenej známych vstupných hodnôt bola určená rezistivita zeme, nakoľ ko jej presné určenie je v reálnych podmienkach prakticky nemožné. V predchádzajúcej kapitole bolo ukázané, že v niektorých prípadoch sa jej hodnota môže meniť od desiatok až po desať tisícky jednotiek.

**Vplyv zmeny rezistivity zeme na nulovú zložku rezistancie** Grafy sú zoradené v tomto poradí z dôvodu, že Carsonova metóda je považovaná vo všeobecnosti za etalón výpočtových metód elektrických parametrov VEV. Jej zjednodušenia, ktoré sa ukazujú ako takmer totožné sú uvedené za ňou. Na výpočet Carsonovej metódy bolo použitých pre dostatočnú presnosť z nekonečného radu ktorý pôvodne obsahuje len prvých osem členov [30].



Obr. 3.6: Zmena výslednej nulovej rezistancie vedenia pri zmene rezistivity pôdy - Carsonova metóda



Obr. 3.7: Zmena výslednej nulovej rezistancie vedenia pri zmene rezistivity pôdy - Carsonova modifikovaná metóda

**Vplyv zmeny rezistivity zeme na nulovú zložku indukčnosti** V prípade nulovej indukčnosti platí, ako v predchádzajúcich prípadoch, že najvyššie hodnoty sú dosahované bez použitia zemných lán. Rezistivita zeme má teda na nulovú indukčnosť vedení väčší vplyv ako na jeho rezistanciu.



Obr. 3.8: Zmena výslednej nulovej indukčnosti vedenia pri zmene rezistivity pôdy - Carsonova metóda



Obr. 3.9: Zmena výslednej nulovej indukčnosti vedenia pri zmene rezistivity pôdy - Carsonova modifikovaná metóda a metóda jednotnej návratovej hĺbky prúdu v zemi

**Zhrnutie výsledkov zmeny rezistivity zeme** V tejto časti práce boli skúmané elektrické parametre pri zmene rezistivity zeme pod vedením. Pri výpočtoch boli realizované výpočty v celom spektre rezistivity zeme, aby boli znázornené zmeny výsledných parametrov pre jednotlivé výpočtové metódy. Napriek odlišným výsledným parametrom pri použití rozličných výpočtových metód v celom spektre menených vstupných veličín, v hraniciach štandardne vyskytujúcich sa vstupných veličín boli výstupné elektrické parametre takmer totožné.

Je vidno, ktoré elektrické parametre sú najviac závislé na rezistivite zeme pod vedeniami. Najviac ovplyvňovaný parameter bola nulová indukčnosť, kde sa jej hodnota bez použitia zemných lán menila až o polovicu pôvodnej hodnoty, čo je značný rozdiel. Pri použití zemných lán sa tento rozdiel zmenšoval až do nárastu len približne 16%. Ovplyvnená je v tomto prípade aj nulová zložka rezistancie, kde najvyšší percentuálny nárast dosiahol približne 12%, a to pri použití jedného zemného lana. V nulovej rezistancii si zároveň je možné všimnúť, že metóda jednotnej návratovej hĺbky prúdu v zemi spolu s Carsonovou modifikovanou metódou majú najmenej presné hodnoty oproti štandardnej Carsonovej metóde (do 6,5%) a zároveň nižší nárast zmeny výsledných parametrov s maximálnym rozdielom len 9%. Najvhodnejšou metódou sa ukázala byť metóda Taku Noda, ktorá takmer dokonalo kopíruje Carsonove pôvodné rovnice v tejto oblasti použitia.

### 3.2.3 Zmena parametra reťazovky vodičov

Ako posledná podrobne hodnotená veličina bola určená hodnota parametra reť azovky c[m]. Pre modelový stožiar bola nájdená výška najnižšieho bodu najnižšieho vodiča 1,12 m nad zemou pri parametri c = 100 [m], ktorá sa zvyšovala až po hodnotu c = 5000 [m] po kroku 5. Vypočítané hodnoty parametrov boli realizované pomocou metódy Taku Noda. Tento výpočet bol realizovaný už spomínaným softvérom EMFTsim, ktorý je bol vytvorený tak, aby bol schopný počítať elektrické parametre VEV zohľ adňujúci tvar reť azovky a tým pádom eliminuje zjednodušenie vo forme strednej výšky vodiča nad zemou. Zvyšovaním hodnoty parametra c sa vodič stále viac napína, čím sa zmenšuje vplyv zeme najmä na nulovú zložky kapacity. Vplyv priehybu vodiča je možné pozorovať na nulovej kapacite, ktorá sa v prípade najviac uvoľ neného vodiča líši až o 15% oproti vodiču napnutému. Pre súslednú hodnotu kapacity sa táto zmena rovná približne 1,3%.



Obr. 3.10: Zmena výslednej nulovej kapacity vedenia pri zmene parametra reť azovky c

## 3.2.4 Vplyv výberu vodičov na elektrické parametre

V prípade rekonštrukcie, prestavby alebo výstavby VEV projektant navrhuje fázové vodiče aj zemné laná z mechanického aj elektrického hľadiska. Spravidla je pri každom návrhu vedenia predložených viacero alternatív vyhotovenia, a teda a viacero alternatív výsledných parametrov VEV. Táto podkapitola slúži ako praktický príklad aplikácie využitia nadstavby softvéru EMFT-sim pri projektovaní VEV, v prípade nekompletných podkladov alebo ešte neznámych všetkých prvkov na vedení. Je možné usúdiť zmenu parametrov pri použití konkrétnej kombinácie vodiča so zemným lanom. Celkovo najviac ovplyvňovaný parameter touto zmenou vodičov bola nulová rezistancia a najmenej súsledna kapacita vedenia. Takáto analýza nie je časovo náročná, a zároveň vie ponúknuť projektantovi predbežný pohľad na elektrické parametre vedenia, ktoré bude neskôr potrebovať dodať objednávateľovi.

AlFe [FV]			240/39				
AlFe [ZL]	38/32	85/83	180/59	185/31	240/39		
R	[Ohm/km]						
0	0.36691	0.30087	0.24586	0.24398	0.22803		
1	0.11966	0.1196	0.1195	0.1195	0.11947		
L	[mH/km]						
0	3.76391	3.44888	3.36703	3.37391	3.35272		
1	1.26006	1.25925	1.25896	1.25897	1.25889		
С	[nF/km]						
0	5.8450	5.8530	5.8570	5.8560	5.8580		
1	9.2620	9.2630	9.2640	9.2640	9.2640		

Tabuľka 3.2: Zmena konkrétnych AlFe lán na pozícii zemného lana na stožiari súdok a ich vplyv na výsledné elektrické parametre v zložkových sústavách

## **3.3** Podklady pre výpočet elektrických parametrov

Na presný výpočet elektrických parametrov VEV je potrebné poznať detailne elektrické vedenie, pre ktoré je nutné tieto parametre spočítať. Jedná sa konkrétne o dokumenty:

- Prehľ adný súpis
- Schéma sledu fáz
- Montážne tabuľ ky
- Dokumentácia k použitým vodičom
- Schematické výkresy použitých stožiarov
- Geodetické a geologické merania

Z uvedených, sa najmenej uvažuje s geodetickými a geologickými meraniami, keď že nie vždy sú tieto merania realizované, a zároveň komerčne dostupný softvér nie je naprogramovaný na výpočty elektrických parametrov s terénom.

Na druhej strane, je nutné poznať prehľadný súpis, schému sledu fáz, dokumentáciu k použitým vodičom, a schematické výkresy stožiarov. Tieto dokumenty definujú z najväčšej časti výsledné elektrické parametre. Montážne tabuľky poslúžia na určenie jednotlivých priehybov vodičov, resp. na určenie priemerného priehybu ktorý sa používa pri výpočtoch.

Najčastejšie nepresné vstupné veličiny sú:

- terén (zanedbávaný)
- rezistivita zeme (priemerná hodnota)
- priehyb vodičov (priemerná hodnota)
- presný typ stožiara (použitý najbližší podobný)
- informácie o vodičoch (použitý najbližší podobný)

Vplyv terénu a rezistivity pôdy je zhrnutý v tab. 2.6, kde rozdiel medzi vypočítanými a reálnymi hodnotami môže byť v niektorých prípadoch až do 20% v nulových zložkách a do 5% v súsledných zložkách (nepresná, viac vrstvová hodnota rezistivity zeme + zanedbaný veľ mi hornatý terén) elektrických parametrov. Vplyv priehybu vodičov bol analyzovaný pri teórii tečení vodičov (1% rozdiel kapacity), ale aj pri analýze zmeny parametra reť azovky vodičov v podkapitole 3.2.3. Z nej, pokiaľ vezmeme reálne používané hranice tohoto parametra od 700 - 2500 m, tak rozdiel kapacity v nulovej zložke je 0,5% a v súslednej 0,03%. Konkrétny typ stožiara sa týka hlavne jeho typizácie (starší, novší typ), nie výškového typu (N+12, II+6, a pod.), či tvaru (Mačka, Donau a pod.). Rozdiely medzi takýmito stožiarmi sú na konzolách v rámci +/-1 m od známych typov stožiarov. Najväčší rozdiel vo výsledných parametroch je v nulovej zložke kapacity, a to 3,22%. Zvyšné elektrické parametre nepresiahli pri širšom vyložení konzol o 1 m rozdiel ani 1 %.

Posledným bodom sú informácie o vodičoch, ktoré boli na konkrétnych príkladoch analyzované v podkapitole 3.2.4. Rozdiel v prípade podobných vodičov (z tab. 3.2 vodiče AlFe 180/59 a 185/31) je tiež pod 1%, pokiaľ sa uvažujú ako zemné laná. Fázové vodiče sú vo všeobecnosti známe a nie je problém s ich dokumentáciou. Zemných lán je však omnoho viac druhov, hlavne keď ide o kombinované zemné laná s optickými vláknami. V týchto prípadoch je možné, že presný typ a dokumentáciu zemného lana je problematické zohnať.

Celkový možný vplyv neúplnosti vstupných údajov do výpočtu elektrických parametrov je nasledovný:

- Rezistancia do 20% nulová zložka, do 5% súsledná zložka
- Indukčnosť do 20% nulová zložka, do 5% súsledná zložka
- Kapacita do 25% nulová zložka, do 5% súsledná zložka

# 4 Elektromagnetické polia a elektrické parametre vedení

V tejto kapitole je úvod do analýzy prepojenia elektrických parametrov a elektromagnetických polí vonkajších elektrických vedení. Možno povedať, že obe majú totožný teoretický základ. Maxwellove rovnice. Teória elektromagnetizmu nám dovolila zjednodušiť tieto rovnice, nakoľko polia v energetike môžeme považovať za kvázistacionárne [31]. Umožní nám to teda zanedbať časové derivácie v Maxwellových rovniciach a rozdeliť tak úlohu na dve samostatné časti - Elektrické a Magnetické pole.

## 4.1 Aproximácie pri výpočtoch elektromagnetických polí

Väčšina dostupných softvérov počíta elektromagnetické polia v okolí vedení cez zjednodušenie reť azovky vodičov, podobne ako to robia všetky metódy výpočtu elektrických parametrov. V tomto prípade je teda používaný nekonečne dlhý rovný vodič v najnižšej výške reálneho vodiča ako náhrada reť azovky zaveseného vodiča. Pri výpočte elektrických parametrov je táto výška posunutá o 1/3 maximálneho priehybu nahor. Pri elektromagnetických poliach je pre najdôležitejšia maximálna hodnota (najnižší vodič / najnižšia poloha) poľa, zatiaľ čo pri parametroch je podstatná čo najväčšia presnosť priemerných hodnôt na danom úseku (vodič priemerne v 2/3 jeho maximálneho priehybu). V hornatých oblastiach, akou je aj Slovensko, je dôležitý aj vplyv terénu. Doteraz žiadna používaná metóda výpočtu elektrických parametrov neuvažuje vplyv terénu ako takého, len priemernú výšku vodiča nad zemou. Softvér EMFTsim aj s nadstavbou na výpočet elektrických parametrov však výpočty s terénom umožňuje.

## 4.2 Prepojenie elektrických parametrov a polí

Elektrické parametre vedení vychádzajú z rovnakých teoretických základov. Polia sa ďalej riešia podľa Gaussovej vety a metódy zrkadlenia (intenzita elektrického poľa) alebo Poissonovej rovnice a Biot-Savartovým zákonom (indukcia magnetického poľa). Výpočet impedancie vedení definoval Carson v článku "Wave Propagation in Overhead Lines With Ground Return", ktorých odvodenie je sa dá nájsť v [32, 33]. Vlnové vlastnosti šírenia sa signálu (telegrafné rovnice - vzťah 4.1) boli aplikované na elektrický prúd vo vodičoch.

$$U_{1} = U_{2} \cosh(\gamma x) + I_{2} Z \sinh(\gamma x)$$

$$I_{1} = I_{2} \frac{1}{Z} \sinh(\gamma x) + I_{2} \cosh(\gamma x)$$
(4.1)

Elektrické pole (a teda aj kapacita) je závislé na od rozloženia potenciálu na všetkých okolitých objektoch, zatiaľ čo indukciu magnetického poľa (a teda aj indukčnosť) je ťažko ovplyvniť bežnými predmetmi, ktoré by sa nachádzali v blízkosti skúmaného vodiča. Súvisí to okrem iného aj s vlastnosť ami prostredia - permitivitou a permeabilitou. Permeabilita (schopnosť ovplyvňovať magnetické pole) je pre väčšinu materiálov takmer zanedbateľ ne odlišná, zatiaľ čo permitivita (schopnosť ovplyvňovať elektrické polia) sa často líši niekoľ ko násobne. Najreálnejšia spojovacia línia elektromagnetických polí a elektrických parametrov vedie cez prenášanú energiu VEV. Z teórie elektromagnetického poľ a je možné z nižšie uvedených vzť ahov vypočítať hustotu energie elektrického a magnetického poľ a v jednom bode v lineárnom prostredí vo vákuu:

$$w_E = \frac{1}{2}\vec{D}.\vec{E} = \frac{\epsilon_0}{2}|\vec{E}|^2$$
(4.2)

$$w_B = \frac{1}{2}\vec{H}.\vec{B} = \frac{1}{2\mu_0}|\vec{B}|^2 \tag{4.3}$$

Integrovaním vyššie vypočítaných hustôt je možné získať celkovú energiu elektrického poľ a  $W_E$  alebo analogicky aj magnetického  $W_B$  poľ a vyžiarenú v celom objeme V.

Na Obr. 4.1 je vidno znázornenie jedného vodiča v priečnom reze nad rovným terénom. Tento model je najjednoduchším príkladom výpočtu elektrickým parametrov aj elektromagnetických polí, na ktorom by bolo možné v budúcnosti overiť teóriu získania elektrických parametrov z elektromagnetických polí.



Obr. 4.1: Znázornenie jedného vodiča nad terénom ako model pre prvotné výpočty elektromagnetických polí okolo neho - napravo návrh dynamickej štvorcovej siete v modeli v závislosti od blízkosti k zdroju elektromagnetického poľ a

Z okrajových podmienok je vidno, že aj pri najtriviálnejšom príklade nie je samotné prepojenie matematicky vôbec jednoduché. Problém zadefinovaného presného priestoru V, v ktorom bude prebiehať numerická integrácia hustôt elektrického a magnetického poľa, sa dá v smere Z nastaviť na jednotkovú hodnotu 1 [m] pri zanedbaní priehybu, aby sa úloha zjednodušila z troch rozmerov na dvojrozmernú. Následne v smeroch X a Y bude potrebné definovať dostatočnú vzdialenosť od vodiča, v ktorej je potrebné skúmať elektrické a magnetické polia a od ktorej hodnoty sú príspevky už zanedbateľ né. Posledný problém s priestorom výpočtu je voľba správneho kroku, po ktorom by v ňom boli počítané hodnoty magnetickej indukcie a intenzity elektrického poľa. Bolo by potrebné nájsť hranicu (alebo hranice) oba rozmery kedy by bola vytvorená matica (alebo teda pole výsledkov) už dostatočne hustá aby sme dosiahli čo najmenšiu chybu pri čo najmenšom počte údajov. Pokiaľ by bol uvažovaný vo výpočte aj tretí rozmer, a teda po správnosti vodič kopírujúci tvar reť azovky, výpočty by sa stali ešte o značnú časť komplikovanejšie keď že šírenie elektromagnetických polí prebieha v každom smere a teda by bolo nutné vyvinúť efektívny matematický aparát ktorý by vedel s dostatočnou presnosť ou spočítať takéto šírenie a príspevky všetkých bodov ku všetkým bodom v 3D modelovanej oblasti okolo vodiča.

Nech je zatiaľ pre jednoduchosť uvažovaná len energia obsiahnutá v magnetickom poli v okolí vodičov kvôli jej ľahšie namerateľ nejšiemu charakteru. V prípade reálnej aplikácie sa vyskytuje niekoľko problematických bodov, ktoré by bolo nutné odstrániť aj po úspešnom simulačnom modeli:

- Presné meranie pod vedením potrebné určiť čo najpresnejšie vzdialenosti od vodičov v mieste merania v celej dĺžke a šírke vedenia
- Výpočet na základe geometrickej symetrie na základe známej geometrie vedenia a nameraných hodnôt magnetickej indukcie by ostatné hodnoty v uvažovanom priestore museli byť dopočítané
- Znalosť okamžitej prevádzky vedenia nutnosť poznať presné hodnoty prúdu vo vodičoch v čase merania aby mohli byť výsledné hodnoty magnetickej indukcie vztiahnuté na jednotkový prúd
- Komplexnejšie usporiadanie vodičov v distribučnej aj prenosovej sústave sa využíva trojfázový systém, čiže simulačný model by musel spĺňať minimálne podmienku vedieť zahrnúť do výpočtu tri vodiče s ľubovoľným prúdovým zaťažením a fázou

Napriek momentálne otáznej realizácii simulačného 3D modelu a fyzického merania pod vedením je však možné definovať vplyvy na elektrické parametre vychádzajúc z vyššie uvedeného navrhnutého postupu merania elektromagnetických polí. Tieto faktory sú:

- Veľkosť elektromagnetického poľa, ktorá závisí od rozloženia vodičov a ich prúdovonapäť ových pomerov priamo definuje elektrické parametre VEV.
- Presnosť zaznamenaných údajov priamo definuje výpovednú hodnotu výsledkov pri nedostatočnej presnosti merania sa odchýlky pri výpočtoch elektrických parametrov ešte zvýšia (napríklad pri nesprávnom určení prúdu je chyba rovná mocnine chyby prúdu na druhú pre magnetickú indukciu poľ a a teda aj indukčnosť vedenia.
- Na namerané hodnoty elektromagnetických polí vplýva množstvo externých objektov, ako napríklad ostatné vedenia pri ich križovaní alebo súbehu, železničné trakčné vedenia alebo aj plynové a iné metalické potrubia.

# Prínosy pre prax

Práca sa zaoberá problematikou výpočtu elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení, ktorá je podstatná hlavne pre projekciu vonkajších elektrických vedení. Vypočítané parametre sú súčasť ou každej dokumentácie projektov rekonštrukcie, alebo výstavby vedení, a sú taktiež používané v mnohých simuláciách elektrizačnej sústavy. Je preto potrebné venovať im značnú pozornosť. Hlavné prínosy práce do tejto problematiky sa dajú zhrnúť do nasledovných bodov:

- Bola vytvorená softvérová nadstavba programu EMFTsim, ktorá je komplexným výpočtovým aparátom pre výpočet elektrických parametrov. Jej možnosti obsahujú:
  - výpočet pomocou všetkých známych metód
  - výpočet s uvážením terénu pod vedením (3D model)
  - výpočet podľa reálnej reť azovky zaveseného vodiča
  - nelimitovaný počet fázových vodičov
  - nelimitovaný počet zemných lán
  - použitie dvoch rôznych stožiarov na rozpätí
  - viaceré možnosti grafických a textových výstupov
  - automatická zmena vybraných vstupných veličín do výpočtu možnosti citlivostných analýz
  - editovateľ ná databáza vodičov
  - možnosť voľby kroku výpočtu
  - možnosť modelovania ľubovoľného rozpätia
- V práci sú zhrnuté všetky výpočtové metódy elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení.
- Boli vytvorené analýzy vonkajších vplyvov na výstupné elektrické parametre vedení. Závery z analýz sú aplikované v naprogramovanej nadstavbe.
- Pomocou vytvorenej nadstavby boli realizované nasledújúce analýzy:
  - Zmena vybraných hraničných hodnôt vstupných veličín a ich vplyv na výstupné elektrické parametre - určenie maximálneho možného rozdielu výsledných parametrov v praxi
  - Určenie presnosti jednotlivých metód vzhľadom ku Carsonovej pôvodnej metóde
  - Zmena konkrétnych fázových vodičov a zemných lán a ich vplyv na výstupné elektrické parametre použitie softvéru v praxi, analýza určená pre prípravnú časť návrhu elektrických vedení
- Zhodnotené boli podklady, ktoré je nutné poznať pre exaktný výpočet elektrických parametrov vedení, zároveň vyhodnotené reálne možnosti získania daných podkladov. Z nutnosti zjednodušenia niektorých vstupných veličín v praxi, boli vyvodené reálne možné rozdiely vypočítaných a skutočných elektrických parametrov.

# Záver

Dizertačná práca s zaoberá problematikou výpočtu elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení. Na začiatku je uvedený historický prehľad a chronológia, s akou sa vyvíjali tieto výpočty. Ukázalo sa, že základnou metódou sú aj naďalej Carsonove pôvodné rovnice z roku 1926. Ich matematická náročnosť je kompenzovaná presnými výsledkami, a preto sa dodnes používajú v množstve výpočtových programov (napríklad EMTP, Matlab). Nástupcom tejto metódy by mohla byť mladšia metóda od Taku Noda, ktorá vykazuje veľmi presné výsledky aj za použitia jednoduchších matematických operácií.

Boli zhrnuté všetky momentálne používané spôsoby výpočtu impedancie a admitancie vedení, ktoré môžu do budúcna slúžiť napríklad pre účely ďalšieho štúdia alebo už len ako samotná ilustrácia rôznych prístupov k problému. Zhrnutie obsahuje aj transformácie do zložkových sústav, teóriu výpočtu GMR, konverzie striedavého jednosmerného odporu na striedavý pre jednotlivé konštrukcie vodičov a zahrnutie zväzkového vodiča či zemných lán do výpočtov. Ku všetkým vedeniam je pristupované v prvom rade ako k netransponovaným, inak povedané, výsledky sú interpretované hlavne vo forme matíc parametrov vedenia.

Práca sa zaoberá taktiež analýzou vstupných faktorov do výpočtov parametrov vonkajších elektrických vedení. Pojmy permeabilita a permitivita prostredia boli kľúčové na hodnotenie takýchto neistôt. Vplyvy od stožiarov vonkajších elektrických vedení, lokálne klimatické extrémy (ako dážď, hmla či vietor) a taktiež aj rezistivita pôdy bola súčasť ou tohoto hodnotenia. Ako jediný relevantný druh odchýlky bola vyhodnotená rezistancia zeme, kde bola načrtnutá problematika reálnejšieho modelu viacvrstvovej pôdy pod vedením. V najnepriaznivejšom prípade bola zaznamenaná odchýlka vzájomných impedancií až takmer 40%, zatiaľ čo vlastné impedancie sa pohybovali na hranici maximálne 10%. Starnutie vedení bolo vyhodnotené ako dostačujúco presné (odchýlka max 1,3%), rovnako ako aj zanedbanie korózie vodičov, kde prebieha hlavne degradácia mechanických vlastností lana.

Bolo priblížené odvodenie vzť ahu na výpočet návratovej hĺbky prúdu v zemi. Vo všeobecnosti sa nedá povedať, či je uvažovaná hĺbka správna, keď že experimentálne merania sú v týchto podmienkach prakticky nemožné (jedná sa o hĺbky v rádovo stovkách metrov). Urobená bola aj analýza, za akých podmienok by ju bolo teoreticky možné experimentálne zmerať. Hypotetická možnosť sa nachádza v roztoku NaCl, ktorý má ako jediný z uvažovaných a bežne dostupných materiálov dostatočne malý merný odpor a zároveň nie je potrebné mať zdroj s extrémne vysokými požiadavkami na frekvenciu (uvažovaných 5 kHz). V tomto ideálnom príklade by bol prúd v hĺbke asi 2,7m. Hodnotená bola závislosť elektrických parametrov od vstupných veličín. Jedná sa o grafické znázornenie vnášania nepresností do výpočtu, teda zadávaním nepresných či neznámych vstupných veličín do konkrétneho výpočtového modelu. Jednoduchšou metódou boli vytvorené makrá na opakované počítanie v programe Microsoft Excel. Zároveň boli uvažované pri každom výpočte alternatívy ako: bez zemného lana, so zemným lanom, viac zväzkové vodiče a viac systémové vedenia. Druhý spôsob zahŕňal výpočet cez program EMFTsim, ktorý bol upravený do podoby aby bol schopný počítať elektrické parametre VEV podľa všetkých spomenutých výpočtových metód. Vyhodnotené zmeny rezistivity zeme, jednotkovej rezistancie zemných lán a parameter reť azovky vodiča vo vzť ahu k vstupným veličinám pre všetky výpočtové metódy. Najpodobnejšia ku Carsonovej metóde bola metóda Taku Noda, s takmer nulovou odchýlkou vo všetkých parametroch. Zhodnotený bol aj praktický príklad aplikácie programu EMFTsim pri projekčnej činnosti, konkrétne pri voľbe fázových vodičov a zemných lán.

Posledná kapitola tejto práce sa zaoberá prepojením teórie elektromagnetických polí a elektrických parametrov VEV. Bol rozpracovaný matematický postup akým spôsobom by bolo možné takéto meranie (a simuláciu) realizovať, no v konečnom dôsledku bolo zhodnotené ako veľmi náročné napríklad z hľadiska presnosti výsledkov či spôsobu získavania meraných hodnôt v teréne alebo už len vytvorenie 3D modelu vedenia. Priame prepojenie bolo nájdené v energii prenesenej cez VEV, ktoré možno vypočítať cez teóriu elektromagnetizmu, z ktorej možno následne za ideálnych podmienok vyjadriť hodnoty indukčnosti a kapacity. Takto získané elektrické parametre teda súvisia len od veľkosti prenesenej energie elektromagnetickým poľ om vedenia, ktoré však súvisí s množstvom iných faktorov.

Hlavným prínosom dizertačnej práce je implementovanie používaných výpočtových metód elektrických parametrov do nadstavby výpočtového softvéru, a ich vzájomné porovnanie a hodnotenie pre vybrané meniace sa vstupné parametre. Tieto vstupné parametre vo všeobecnosti odzrkadľujú chyby, ktorých je možné sa dopustiť v praxi a teda ovplyvniť tak výpočet. Najkritickejšie výsledky sa ukázali hlavne pri nulových zložkách pri neznámych hodnotách rezistivity zeme, nesprávne určenému terénu pod vedením pre kapacity, či priamo zlým určením fázových vodičov čo zemných lán. Na súslednú zložkovú sústavu nemali okrem vyššie uvedených vstupných parametrov ostatné vstupné parametre takmer žiadny vplyv. V neposlednej rade poukázanie na oblasť elektromagnetických polí a elektrických parametrov má potenciál na pokračovanie v ďalšom výskume a môže byť v budúcnosti realizovaný ako najprv simulácie napríklad v softvéri Ansys Maxwell alebo neskôr ako prípadná alternatívna metóda merania elektrických parametrov.

## Literatúra

- [1] Fecko, Š. and col., Vonkajšie Elektrické Vedenia, 2010.
- [2] UTS, "Power Circuit Theory Notes Lecture 5," 2011.
- [3] Lewis, W.A. and Tuttle, P. D., "Resistance and Reactance of Aluminium Conductors Steel Reinforced," 1959.
- [4] Working Group B2.43, "Guide for thermal rating calculations of overhead lines," December 2014.
- [5] Verebélÿ, L., Prenos elektrickej energie, II. zväzok Rozvodné a diaľkové vedenia, 1956.
- [6] Carson, J. R., "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return," *Bell System Technical Journal*, vol. 5, pp. 539–554, 1926.
- [7] Gary, C., "Complete Approach to Multiconductor Propagation at High Frequencies with Complex Matrices," *EDF Bulletin de la Direction des Études et Reserches*, pp. 5–20, 1976.
- [8] Dubanton, C., "Approximate Calculation of Primary and Secondary Transmission Line Parameters, Zero Sequence Values," *EDF Bulletin de la Direction des Études et Reserches*, pp. 53–62, 1969.
- [9] Deri, A., Tevan, G., Semlyen, A. and Castanheira, A., "The Complex Ground Return Plane a Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return," *IEEE Transactions* on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 8, pp. 3686–3693, 1981.
- [10] Umarji, H., "Calculation of Parameters of Overhead Power Lines." [Online]. Available: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137455925/Resumo\_ingles.pdf
- [11] Vintan, M., Mihu, P. I. and Borlea, I., "AC Power Lines Impedances Computational Methods," 2010. [Online]. Available: http://www.energy-cie.ro/archives/2011/3.16-2\_vintan\_m\_corectat.pdf
- [12] Noda, T., "Development of a transmission-line model considering the skin and corona effects for power systems transient analysis," Ph.D. dissertation, Doshisha University in Kyoto, Japan, 1996.
- [13] Rivas, R. A., "Overhead Transmission Lines and Underground Cables," in *Handbook of Electric Power Calculations*, 2001.
- [14] Dommel, H. W., *Electromagnetic Transients Program Theory Book*, 1986.
- [15] Podolinský, P. and Kurimský, J., "Súvisia priečne straty a zrážky?" ELEKTROENERGE-TIKA, vol. 7, no. 2, 2014.
- [16] Gerendas, D. and Novothny, F., "Transmission line with asymmetrical phase arrangement," *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, pp. 1–7, 2011.

- [17] Changhui, Y. and col., "Computation of unbalance factors for six-circuit transmission line on the same tower," in 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference, vol. 2, Sept 2011, pp. 217–220.
- [18] Bendík, J., "Elektromagnetické polia v okolí vonkajších silových vedení," Ph.D. dissertation, Slovak Technical University in Bratislava, 2018.
- [19] Zein, A, "Parameters affecting the charge distribution along overhead transmission lines" conductors and their resulting electric field," (Accessed on 12/15/2016).
- [20] Modric, T. and Vujevic, S., "Computation of the electric field in the vicinity of overhead power line towers," March 2016, (Accessed on 12/15/2016).
- [21] Papagiannis G. K. and col., "A systematic approach to the evaluation of the influence of multilayered earth on overhead power transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 4, pp. 2594–2601, Oct 2005.
- [22] Muhr, M., Pack, S., Schwarz, R. and Jaufer, S., "Calculation of overhead line sags," September 2005, (Accessed on 12/15/2016).
- [23] WG 05, "A practical method of conductor creep determination," *Electra*, 1972.
- [24] Shang-Shu, K. and col., "Change of properties by environment conditions in aged acsr overhead conductor," *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, 2006.
- [25] Enegela, O. P., "Ageing of overhead conductors," Ph.D. dissertation, The University of Manchester, 2013.
- [26] Arrifin, M., "Classification of critical aging segments of power transmission lines," Master's thesis, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 2011.
- [27] Goh, H.H. and col., "Critical aging segments of power transmission line," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2013.
- [28] Kersting, W.H. and Green, R.K., "The application of carson's equation to the steady-state analysis of distribution feeders," in *Power Systems Conference and Exposition (PSCE)*, 2011 IEEE/PES, March 2011, pp. 1–6.
- [29] Kiessling, F. and col., Overhead Power Lines Planning, Design, Construction, 2002.
- [30] Cenký, M., Bendík, J. and Eleschová, Ž., "Advanced electrical parameters calculations of the untransposed overhead lines in comparison to standard computational methods," *Power engineering 2016*, pp. 145–148, May 31 - June 2 2016.
- [31] Bendík, J., "Elektromagnetické polia vonkajších elektrických vedení vvn a zvn z hľadiska limitov expozície obyvateľov a dôsledky vyplývajúce pre návrh vedení," Master's thesis, Slovak University of Technology in Bratislava, 2015.
- [32] Olsen, R. G. and Pankaskie, T. A., "On the exact, carson and image theories for wires at or above the earth's interface," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 4, pp. 769–778, April 1983.
- [33] Woodhouse, D., "On the theoretical basis of carson's equations," in 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Oct 2012, pp. 1–6.

# Zoznam publikácií autora

CENKÝ, M. – BENDÍK, J. – ELESCHOVÁ, Ž. Advanced electrical parameters calculations of the untransposed overhead lines in comparison to standard computational methods. In Power engineering 2016. Energy-Ecology-Economy 2016: 13th International scientific conference. Tatranske Matliare, Slovakia. May 31 - June 2, 2016. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2016, s. 145–148. ISBN 978-80-89402-86-1.

CENKÝ, M. – BENDÍK, J. Evaluation of selected electrical parameters calculation methods for overhead transmission lines. In ELITECH<sup>-</sup>16: elektronický zdroj 18th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. June 8, 2016. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, ISBN 978-80-227-4561-1.

CENKÝ, M. – PÍPA, M. – KMENT, A. Computations of electrical parameters of untransposed overhead lines. In EPE 2015: 16th International scientific conference on electric power engineering. Kouty nad Desnou, Czech Republic. May 20-22, 2015. Ostrava : VSB - Technical University of Ostrava, 2015, s. 406–411. ISBN 978-1-4673-6787-5.

CENKÝ, M. – BENDÍK, J. – ELESCHOVÁ, Ž. – IVANIČ, M. Positive sequence electrical characteristics of incompletely developed three-phase power cable. In ELITECH'17: elektronický zdroj 19th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 24, 2017. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017, ISBN 978-80-227-4686-1.

CENKÝ, M. – BENDÍK, J. – IVANIČ, M. – ELESCHOVÁ, Ž. Electrical characteristics of incompletely unrolled three-phase power cable on wooden drum. In Elektroenergetika 2017: elektronický zdroj 9th International scientific symposium on electrical power engineering. Stará Lesná, Slovak Republic. September 12-14, 2017. Košice : Technical University of Košice, 2017, s. 675–680. ISBN 978-80-553-3195-9.

CENKÝ, M. – BENDÍK, J. – ELESCHOVÁ, Ž. Advanced methods for computation of electrical parameters for overhead transmission lines. Journal of Electrical Engineering :, 68. s. 143–147.

CENKÝ, M. – BENDÍK, J. – ELESCHOVÁ, Ž. – IVANIČ, M. Positive sequence electrical characteristics of incompletely developed three-phase power cable. In ELITECH'17: elektronický zdroj 19th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 24, 2017. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017, ISBN 978-80-227-4686-1.

CENKÝ, M. – BENDÍK, J. – ELESCHOVÁ, Ž. – BELÁŇ, A. – CINTULA, B. Automated data sorting advancements for electrical parameters computations for long overhead transmission lines. In JANÍČEK, F. – ELESCHOVÁ, Ž. Power engineering 2018. Energy-Ecology-Economy 2018: 14th International scientific conference. Tatranske Matliare, Slovakia. June 5-7, 2018. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2018, s. 133–137. ISBN 978-80-89402-98-4.