

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Evidenčné číslo: FEI-5388-6076

**Elektrické parametre vonkajších elektrických
vedení VVN a ZVN a ich vplyv na potrebu
transpozície vedenia**

Diplomová práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Evidenčné číslo: FEI-5388-6076

**Elektrické parametre vonkajších elektrických
vedení VVN a ZVN a ich vplyv na potrebu
transpozície vedenia**

Diplomová práca

Študijný program: Elektroenergetika

Číslo študijného odboru: 2675

Názov študijného odboru: 5.2.9. elektrotechnika

Školiace pracovisko: Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

Vedúci záverečnej práce: Ing. Marek Pípa, PhD.

Konzultant: Ing. Michal Krucina

Bratislava 2015

Bc. Matej Cenký



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. Matej Cenký**
ID študenta: 6076
Študijný program: Elektroenergetika
Študijný odbor: 5.2.9. elektrotechnika
Vedúci práce: Ing. Marek Pípa, PhD.
Konzultant: Ing. Michal Krucina
Miesto vypracovania: Oddelenie elektroenergetiky, SAG Elektrovod, a. s.

Názov práce: **Elektrické parametre vonkajších elektrických vedení VVN a ZVN
a ich vplyv na potrebu transpozície vedenia**

Špecifikácia zadania:


- 1/ Spracujte prehľad problematiky výpočtu elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení
- 2/ Popíšte kritériá určujúce potrebu symetrizácie elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení transpozíciou
- 3/ Vytvorte program pre výpočet elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení


Riešenie zadania práce od: 17. 02. 2014
Dátum odovzdania práce: 22. 05. 2015


Bc. Matej Cenký
študent

L. S.




prof. Ing. František Janíček, PhD.
vedúci pracoviska


prof. Ing. Alfonz Smola, PhD.
garant študijného programu

POĎAKOVANIE

Rád by som týmto poďakoval Ing. Marekovi Pípovi, PhD. za bezproblémovú spoluprácu pri vypracovávaní tejto práce. Ďalej Ing. Michalovi Krucinovi a Ing. Miroslavovi Bindzárovi za cenné poznatky z praxe projektovania elektrických vedení a v neposlednom rade prof. Ing. Petrovi Ballovi, PhD. za trpezlivosť a vytrvalosť pri našich stretnutiach a diskusiách nielen o fyzikálnych a matematických komplikáciách v práci.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Vyhlasujem že túto prácu som vypracoval samostatne, len za použitia uvedených zdrojov literatúry.

ABSTRAKT

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný program: Elektroenergetika

Autor:	Bc. Matej Cenký
Názov diplomovej práce:	Elektrické parametre vonkajších elektrických vedení VVN a ZVN a ich vplyv na potrebu transpozície vedenia
Vedúci diplomovej práce:	Ing. Marek Pípa, PhD.
Konzultant:	Ing. Michal Krucina
Mesiac a rok odovzdania:	máj 2015

Táto práca sa zaoberá problematikou výpočtu elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení VVN a ZVN. Zo získaných parametrov je predstretý matematický aparát na vyhodnocovanie nesymetrických veličín na vedeniach v ustálenom stave. Tieto veličiny sú rozhodujúce pri rozhodovaní o transpozícii linky. Samotný výpočet parametrov je realizovaný vybraným spôsobom, ktorý bol vyhodnotený ako najefektívnejší spomedzi všetkých možností, ktoré sú tiež analyzované. Praktická časť práce spočíva vo vyhotovenom programe v programovacom jazyku Fortran90, vo vývojovom prostredí NetBeans. Všetky súčasti použité v programe sú v licencií opensource, čo nezaťažuje jeho použitie akýmkoľvek spôsobom. Rovnako nie je náročný na výpočetnú kapacitu počítača. Jeho výstupy boli overené s reálnymi štúdiami vypracovanými v certifikovaných laboratóriách. Táto diplomová práca bola vypracovávaná v spolupráci s firmou SAG Elektrovod, a.s.

Kľúčové slová: Elektrické parametre, Fortran, Transpozícia vedenia, Vonkajšie elektrické vedenia

ABSTRACT

Slovak University of Technology in Bratislava

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

Study programme: Electrical Power Engineering

Author:	Bc. Matej Cenký
Name of the master thesis:	Electrical Parameters of HV and UHV Overhead Lines and their Influence on the Line Transposition
Thesis supervisor:	Ing. Marek Pípa, PhD.
Consultant:	Ing. Michal Krucina
Date of the submission:	May 2015

The thesis is aimed on the computation of the electrical parameters of the overhead transmission lines on high voltage levels. From the parameters obtained, the mathematical apparatus is proposed for the purpose of various asymmetry studies. Those studies are important also in case of the transposition considerations on the line. The calculations of the desired parameters are realised with the method most efficient among the others, which are discussed too. The practical part of the thesis is a PC programme in the programming language Fortran90 developed in the environment NetBeans. All the features of the programme are licensed freeware, what does not limit its usage. Also, there are very low system requirements on the PC. The final outputs were compared with the real values in the official studies made in certified laboratories. The thesis was written in cooperation with the company SAG Elektrovod, a.s.

Keywords: Electrical parameters, Fortran, Line Transposition, Overhead Lines

Obsah

Úvod	1
1 Teória výpočtu elektrických parametrov	2
1.1 Impedancia	2
1.1.1 Carsonove pôvodné rovnice	3
1.1.2 Modifikované Carsonove rovnice	6
1.1.3 Metóda komplexnej hĺbky	7
1.1.4 Aproximovaná metóda	8
1.1.5 AC Rezistencia	10
1.2 Admitancia	11
1.2.1 Kapacitancia	12
1.2.2 Konduktancia	12
1.3 Zväzkový vodič	13
1.4 Symetrická zložková sústava	14
1.5 Redukcia zemných lán	17
2 Nesymetrické vedenia	19
2.1 Kritériá potreby kompenzácie nesymetrie na vonkajších elektrických vedeniach	19
2.1.1 Transpozícia vonkajších elektrických vedení	21
2.1.2 Ostatné spôsoby kompenzácie na vedeniach	22
3 Návrh výpočtu prúdovej nesymetrie vedenia	24
3.1 Vstupné hodnoty do výpočtu	24
3.2 Náhradné schémy prenosového obvodu	25
3.2.1 II-článok	25
3.2.2 T-článok	26

3.2.3	Náhradný model s rozloženými parametrami	27
3.2.4	Porovnanie presnosti náhradných modelov vedenia	28
3.3	Konečné vzťahy	29
4	Program na výpočet elektrických parametrov VEV	31
4.1	Popis programu	31
4.2	Vstupy a výstupy	33
4.2.1	Zadávanie vstupných údajov do súborov	33
4.2.2	Zadávanie vstupných údajov v konzole	34
4.2.3	Výstupné údaje z programu	36
4.3	Logika programu	37
4.4	Verifikácia výsledkov	40
4.4.1	Verifikácia pomocou zložkového tvaru elektrických parametrov	41
4.4.2	Verifikácia pomocou fázových matíc elektrických parametrov	43
	Záver	49
	Literatúra	52
	Appendix A	57
	Appendix B	59
	Appendix C	61

Zoznam obrázkov

1.1	Znázornenie vzdialeností používaných pri výpočtoch vonkajších elektrických vedení	4
1.2	Znázornenie komplexnej hĺbky navrhovanej C. Garym	7
1.3	Dwightove aproximačné krivky	11
1.4	Znázornenie zväzkového vodiča	13
1.5	Rozklad trojfázovej nesúmernej sústavy na zložkové sústavy	15
1.6	Schéma dvojsystémového vedenia so zväzkovými vodičmi a zemnými lanami so vzdialenosťami vzťahnutými na jeden fázový vodič	18
2.1	Krivky popisujúce rozličné faktory nesymetrie pre konkrétne geometrie vedení	20
2.2	Príklad dokonalej trojfázovej transpozície	22
2.3	Príklad čiastočnej trojfázovej transpozície	22
3.1	Náhradná schéma prenosového obvodu pomocou Π článku	26
3.2	Náhradná schéma prenosového obvodu pomocou T článku	26
3.3	Náhradná schéma prenosového obvodu pomocou rozložených parametrov . . .	27
4.1	Užívateľský interface Netbeans IDE verzia 8.0.2	32
4.2	Príklad správne zadaných vstupných hodnôt do programu ELPAM MultiGeo .	34
4.3	Znázornenie voľby druhu výpočtu	35
4.4	Znázornenie voľby konečných výsledkov a samotné výsledky	35
4.5	Zhrnutie skúmaných elektrických parametrov na konci vedenia v textovom súbore	36
4.6	Zhrnutie skúmaných elektrických parametrov na konci vedenia v konzole . . .	36
4.7	Príklad zápisu vypočítanej impedančnej matice ako výsledok výpočtov z programu	36
4.8	Zjednodušený diagram logiky programu ELPAM MultiGeo	37

4.9	Stožiar typu Donau 2x400 kV, ilustračný príklad	40
4.10	Príklad zadávania vstupných hodnôt do Matlabu pre potreby výpočtov elektrických parametrov na vonkajších elektrických vedeniach	42

Zoznam tabuliek

3.1	Porovnanie presnosti náhradných článkov pri zväčšujúcej sa dĺžke vedenia . . .	29
3.2	Percentuálne porovnanie presnosti náhradných článkov pri zväčšujúcej sa dĺžke vedenia	29
4.1	Verifikácia programu počítajúceho elektrické parametre pomocou ich zložkového tvaru - percentuálne porovnanie nepresnosti s programom od VÚJE a pomocou Matlabu	41
4.2	Fázová matica rezistancie vypočítaná VÚJE	43
4.3	Fázová matica rezistancie vypočítaná cez Matlab	43
4.4	Fázová matica rezistancie vypočítaná programom ELPAM MultiGeo	44
4.5	Matica absolútnych chýb rezistancie Matlabu a ELPAM MultiGeo a ich celkové vyhodnotenie vzhľadom na výpočty od VÚJE, a.s.	44
4.6	Fázová matica indukcie vypočítaná VÚJE	45
4.7	Fázová matica indukcie vypočítaná cez Matlab	45
4.8	Fázová matica indukcie vypočítaná programom ELPAM MultiGeo	46
4.9	Matica absolútnych chýb indukcie Matlabu a ELPAM MultiGeo a ich celkové vyhodnotenie vzhľadom na výpočty od VÚJE, a.s.	46
4.10	Fázová matica kapacitancie vypočítaná VÚJE	46
4.11	Fázová matica kapacitancie vypočítaná cez Matlab	47
4.12	Fázová matica konduktancie vypočítaná programom ELPAM MultiGeo	47
4.13	Matica absolútnych chýb kapacitancie Matlabu a ELPAM MultiGeo a ich celkové vyhodnotenie vzhľadom na výpočty od VÚJE, a.s.	47
4.14	Matica absolútnych chýb parametrov y programu ELPAM MultiGeo a ich celkové vyhodnotenie vzhľadom na výpočty Matlab Simulinku	48
4.15	Zoznam funkcií použitých v programe a ich úlohy	61

Úvod

Výstavba elektrického vedenia je komplexná úloha zahŕňajúca veľký počet odborníkov vo viacerých oblastiach. Jednou z expertíz, ktorú je potrebnú zvládnuť je aj výpočet elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení. Tieto výpočty sú momentálne vo veľkej miere realizované s predpokladom, že vedenie je transponované a vystavané presne podľa navrhovaného projektu. Ak aj predpokladáme, že samotné reálne vyhotovenie vedenia bude totožné s projektom, samotný projekt málokedy spĺňa predpoklady dokonalej transpozície. Použiť preto zjednodušené výpočty nie je presné a v dobe výpočtovej techniky dnes už tak pokročilej ani nutné. Spracoval som viacero možností výpočtov a vybral pre realizáciu ten najvhodnejší. Program, ktorý som vytvoril ráta jednotlivé parametre pre stožiare ľubovoľnej geometrie. Jeho momentálne nastavenie mu umožňuje rátať na maximálne dvojsystémových vedeniach, čo je však jednoducho rozšíriteľné v prípade potreby.

Pomocou správnych výpočtov je možné eliminovať zvýšené náklady na výstavbu a prevádzku vedenia, napríklad práve zaručením vstupných údajov do výpočtu prúdovej nesymetrie na vedení. Ak sa nesymetria preukáže ako nedostatočná, je možné ušetriť na transpozičných stožiaroch. Taktiež sú potrebné na nastavenie ochrán, čo je ďalšia neoddeliteľná súčasť na prenosovej linke. Je teda vidno, že praktická aplikácia týchto výpočtov je značná.

Situácia na Slovensku a v Čechách je však momentálne v stave, kedy sa touto problematikou zaoberá len veľmi malá oblasť ľudí v priemysle. Tieto výpočty sú často krát finančne nákladné, zároveň sa väčšinou používajú už vyvinuté robustné certifikované programy ako napríklad EMTP (Electro Magnetic Transient Program). Niektoré spoločnosti však využívajú aj vlastné vedomosti a postupy ako napríklad VÚJE a.s. Môj program je alternatívou k nim s rovnakou výpovednou hodnotou, či presnosťou dosiahnutých výsledkov.

Kapitola 1

Teória výpočtu elektrických parametrov

Pod pojmom elektrické parametre rozumieme hlavne parametre impedancia (\bar{Z}) a admitancia (\bar{Y}) vedenia. Výpočty oboch sa časom vyvíjali, až dnešného stavu kedy máme k 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. Tieto podmienky ale nie sú takmer nikdy splnené, čo vnáša do výpočtu chybu hneď na začiatku procesu. Nebudem sa preto zaoberať výpočtom, ktorý je v jeho podstate zjednodušením komplexného výpočtu. Budem sa zaoberať celkovým výpočtom parametrov vo všetkých zložkových sústavách pre každý systém. Predpokladám teda vedenie netransponované s ľubovoľne definovateľnými vstupnými hodnotami napätia či prúdu.

1.1 Impedancia

Impedancia - \bar{Z} - je jedným z najdôležitejších hodnôt, ktoré definujú vlastnosti vedenia. Ako je vidno zo vzťahu 1.1, je to komplexná veličina. Jej reálna zložka sa nazýva Rezistencia - (R) a imaginárna zložka Reaktancia - (X). Taktiež budeme rozlišovať pojmy vlastná impedancia (alebo aj hodnoty na diagonále impedančnej matice vo fázovej podobe) a vzájomná impedancia (hodnoty mimo diagonály v impedančnej matici). Vlastná impedancia hovorí o samotnej impedancii vodiča, zatiaľ čo vzájomná o pomyselných impedanciách medzi dvoma vodičmi.

$$\bar{Z} = R + j\omega L = R + jX [\Omega/\text{km}] \quad (1.1)$$

Rezistanciu môžeme chápať ako odpor vodiča, cez ktorý preteká prúd. Bežne v katalógu nájdeme hodnotu pre jednosmerný odpor, ktorý vieme približne skorigovať na hodnotu striedavú. Reaktanciu vieme ďalej rozpísať ako súčin uhlovej rýchlosti a indukcie (L). Práve vo výpočte indukcie nachádzame množstvo rozličných metód počítania. Od prvotných rovníc Carsona v roku 1926, cez počty ktoré uvažujú s komplexnou návratovou hĺbkou prúdu v pomyselnom vodiči, až po moderné zjednodušenia týchto pôvodných ideí a princípov. Bližšie sa na rezistanciu a indukciu pozrieme v nasledujúcej časti.

1.1.1 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 [1]. 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 indukcie. Na Obr. 1.1 je vidno vzájomné vzdialenosti na vonkajšom elektrickom vedení zahŕňajúce spätné cesty prúdu cez zem, znázornené ako obrazy reálnych vodičov voči rovine zeme.

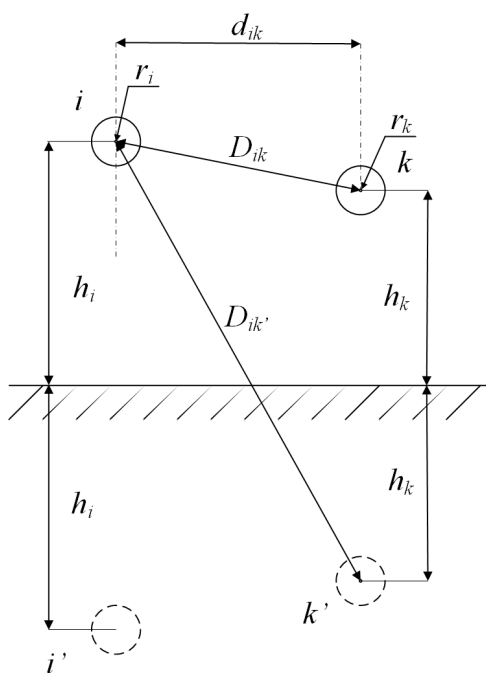
Zo zistených hodnôt potom vieme definovať prvý tvar Carsonových rovníc:

$$\bar{Z}_{ii} = R + jX = z_{int} + j2\omega \ln \left(\frac{2h_i}{r_i} \right) + 4\omega \int_0^\infty (\sqrt{\mu^2 + j} - \mu) e^{-2h_i'\mu} d\mu \quad (1.2)$$

$$\bar{Z}_{ik} = j2\omega \ln \left(\frac{D'_{ik}}{D_{ik}} \right) + 4\omega \int_0^\infty (\sqrt{\mu^2 + j} - \mu) e^{-(h'_i + h'_k)\mu} \cos(d'_{ik}\mu) d\mu \quad (1.3)$$

Kde:

$$\begin{aligned} D'_{ik} &= \sqrt{(h_i + h_k)^2 + d_{ik}^2} & [m] \\ D_{ik} &= \sqrt{(h_i - h_k)^2 + d_{ik}^2} & [m] \\ h' &= h\sqrt{\alpha} & [m] \end{aligned}$$



Obr. 1.1: Znázornenie vzdialeností používaných pri výpočtoch vonkajších elektrických vedení

h	$= H - \frac{2}{3}f_{max}$	$[m]$
d'_{ik}	$= d_{ik}\sqrt{\alpha}$	$[m]$
α	$= 4\pi\lambda\omega$	$[S.m.rad.s^{-1}]$
λ	- vodivosť zeme	$[S.m]$
H	- výška uchytenia vodiča	$[m]$
f_{max}	- maximálny priehyb vodiča	$[m]$

V skrátenej verzii môžeme písať:

$$\bar{Z} = \bar{Z}^0 + \bar{Z}' \quad (1.4)$$

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{12}^0 + \bar{Z}_{12}' \quad (1.5)$$

Kde:

$$\bar{Z}^0 = z_{int} + j2\omega \ln \left(\frac{D'_{ik}}{r} \right) \quad (1.6)$$

$$\bar{Z}'_{12} = j2\omega \ln \left(\frac{D'_{ik}}{D_{ik}} \right) \quad (1.7)$$

$$\bar{Z}' = 4\omega \int_0^\infty (\sqrt{\mu^2 + j} - \mu) e^{-2h'\mu} d\mu \quad (1.8)$$

$$\bar{Z}_{12} = 4\omega \int_0^\infty (\sqrt{\mu^2 + j} - \mu) e^{-(h'_1 + h'_2)\mu} \cos(x'\mu) d\mu \quad (1.9)$$

Toto rozdelenie môžeme chápať aj ako zahrnutie odporu zeme do rovníc [1]. Bez členov 1.8 a 1.9 totiž rovnice vyjadrujú správanie sa systému za predpokladu zeme ako ideálneho vodiča. Ďalšie riešenie tohoto integrálu vedie cez zložitý matematický aparát zahŕňajúci rozvoje do nekonečných radov, či Besselove funkcie. Pre vyčerpávajúci objem dát v tejto práci neuvádzam celý teoretický postup navrhovaný Carsonom, ale už ním upravenú verziu pre jednoduchšiu manipuláciu, ktorú mu umožnila dobrá konvergencia radov. Napriek značným zjednodušeniam, táto metóda stále obsahuje množstvo matematických operácií. Už upravené celé rovnice sú nasledovné:

$$\bar{Z}_{ii} = (R_{AC} + 4\omega PG) + j2\omega G \left(x_i + \ln \frac{2h_i}{r_i} + 2Q \right) \quad (1.10)$$

$$\bar{Z}_{ik} = 4\omega PG + j2\omega G \left(\ln \frac{D_{ik'}}{D_{ik}} + 2\omega Q \right) \quad (1.11)$$

Kde:

$$i = j = 1, 2, ..n$$

$$n = \text{počet fázových vodičov}$$

$$G = 0,1609347 \cdot 10^{-3}$$

$$\omega = 2\pi f$$

Výsledná impedancia \bar{Z} je vyjadrená v $[\Omega/\text{mile}]$. Parametre v rovniciach 1.10 a 1.11 sú definované nasledovne:

$$x_i = \ln \left(\frac{r_i}{GMR_i} \right) \quad (1.12)$$

$$\begin{aligned} P_{ik} = & \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} \cos(\Phi_{ik}) + \frac{k_{ik}^2}{16} \cos(2\Phi_{ik}) \left(0,6728 + \ln \frac{2}{k_{ik}} \right) + \frac{k_{ik}^2}{16} \Phi_{ik} \sin(\Phi_{ik}) \\ & + \frac{k_{ik}^3}{45\sqrt{2}} \cos(3\Phi_{ik}) - \frac{\pi k_{ik}^4}{1536} \cos(4\Phi_{ik}) \end{aligned} \quad (1.13)$$

$$Q_{ik} = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k_{ik}} + \frac{1}{3\sqrt{2}} k_{ik} \Phi_{ik} - \frac{\pi k_{ik}^2}{64} \cos(2\Phi_{ik}) + \frac{k_{ik}^3}{45\sqrt{2}} \cos(3\Phi_{ik}) - \frac{k_{ik}^4}{384} \Phi_{ik} \sin(4\Phi_{ik}) - \frac{k_{ik}^4}{384} \Phi_{ik} \cos(4\Phi_{ik}) \left(\ln \frac{2}{k_{ik}} + 1,0895 \right) \quad (1.14)$$

Kde GMR je definované napríklad v [2] a zároveň:

$$k_{ik} = 8,565 \cdot 10^{-4} D_{ik'} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (1.15)$$

Ani tieto "zjednodušené" vzťahy neboli vo svojich počiatkoch obľúbené [3], no ako aj sám Carson vo svojom článku spomína, v danej dobe to bola jediná exaktná metóda výpočtu impedancie vedení. Rovnako celková idea týchto výpočtov otvára možnosti štúdia nielen parametrov elektrických vedení, ale aj vplyvov vonkajšieho elektrického vedenia na objekty v jeho blízkosti [1].

1.1.2 Modifikované Carsonove rovnice

V modifikovaných rovniciach nachádzame taktiež zjednodušený základ pôvodných rovníc - Rovnice 1.10 a 1.11. Praktickým rozdielom sú však parametre P a Q , ktoré sú v tomto prípade nasledovné:

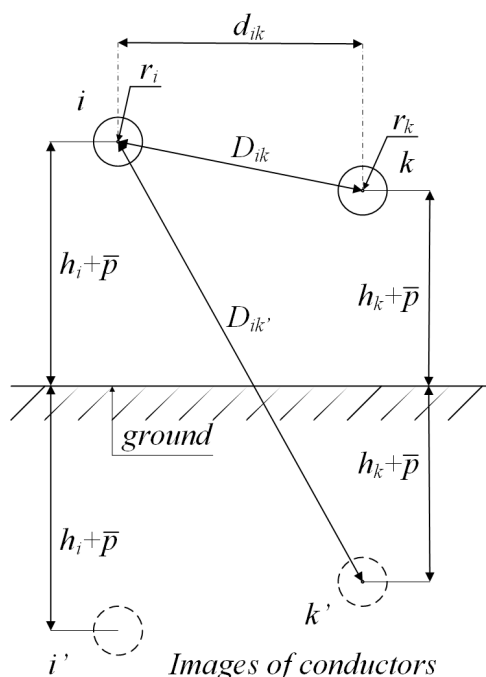
$$P_{ik} = \frac{\pi}{8} \quad (1.16)$$

$$Q_{ik} = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2}{k_{ik}} \right) \quad (1.17)$$

Rozdiel v modifikovaných a originálnych rovniciach je pre reálnu zložku impedancie 0,1334 % a pre imaginárnu zložku impedancie 0,2328 %, čo ukazuje veľmi dobrú zhodu pri výrazne jednoduchších podmienkach výpočtu [3].

1.1.3 Metóda komplexnej hĺbky

Možno ju nájsť aj pod originálnym názvom *CDER - The Complex Depth of Earth Return Model*, ktorú 50 rokov po publikovaní Carsonových prevratných rovníc uviedol C. Gary [4]. Zároveň s ním ju rozvíjali aj Dubanton [5] a Deri [6]. 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 (vid. Obr. 1.2).



Obr. 1.2: Znázornenie komplexnej hĺbky navrhovanej C. Garym

Z vyššie uvedeného príkladu dvoch vodičov a ich obrazov v zemi vieme potom všeobecne zapísať:

$$D'_{ik} = \sqrt{(h_i + h_k + 2\bar{p})^2 + d_{ik}^2}$$

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

Kde:

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu}}$$

\bar{p} - komplexná hĺbka

ρ - rezistivita zeme $[\Omega.m]$

ω - uhlová rýchlosť $[rad.s^{-1}]$

μ - permitivita zeme $[H.m^{-1}]$

Vieme teda napísať vzťahy na výpočet impedancie vedenia pomocou tejto alternatívnej metódy ¹:

$$\bar{Z}_{ii} = R_{ii} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2(h_i + \bar{p})}{GMR_i}\right) = R_{AC} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2(h_i + \bar{p})}{\xi r}\right) [\Omega/km] \quad (1.18)$$

$$\bar{Z}_{ik} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{ik}}{D_{ik'}}\right) [\Omega/km] \quad (1.19)$$

Výhodou tejto metódy je jej jednoduchosť matematického aparátu a zároveň veľmi dobré výsledky. Podľa Umarji [7] je táto metóda totožná čo sa týka výsledkov s Carsonovou a tento predpoklad potvrdil aj v software ATP-EMTP a programe, ktorý bol vytvorený v MATLABe. Ďalšia štúdia od Vintana [8] potvrdzuje efektivitu tejto techniky aj pri vyšších frekvenciách, kde už majú pôvodné rovnice svoje hranice. Zároveň hodnotí presnosť ako veľmi dobrú, no nie totožnú. Pri vysokonapäťovom prenose pri nízkej frekvencii sú však rozdiely naozaj takmer nulové. Ako je vidno, pomocou tejto alternatívnej techniky výpočtu, rovnako ako aj oboch verzii Carsonových výpočtov, je možné jednoducho zostavovať presné impedančné matice ľubovoľných vysokonapäťových prenosových systémov.

1.1.4 Aproximovaná metóda

Stále vychádzame zo vzťahu 1.1, ale v tomto prípade rátame zložky impedancie samostane. Podľa Fecka a kol. [9] sa uvažuje spätná návratová cesta prúdu v hĺbke D_g [m] pomocou 1.20. Totožnú metódu uvažujú napríklad aj na University of Technology Sydney (ďalej len UTS) [10], kde však hĺbkou návratovej cesty prúdu definujú vzťahom 1.21.

$$D_{g1} = \frac{0,178\sqrt{\rho \cdot 10^7}}{\sqrt{f}} = 562,885\sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (1.20)$$

¹obvykle $\xi = 0,7788$

$$D_{g2} = 659 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (1.21)$$

Literatúra neuvádza pôvod týchto vzorcov, no pokiaľ dosadíme obvyklú hodnotu rezistancie zeme $\rho = 100 \Omega.m$ a siet'ovú frekvenciu $f = 50 \text{ Hz}$, je na prvý pohľad zrejmé že výsledky sa budú odlišovať. V tomto prípade konkrétne:

$$D_{g1} = 562,885 \sqrt{\frac{100}{50}} = 796,039 \quad [m]$$

$$D_{g2} = 695 \sqrt{\frac{100}{50}} = 982,878 \quad [m]$$

Tento rozdiel však vo väčšom meradle nie je tak veľký ako sa môže na prvý pohľad zdať. Podľa UTS sa bežné hodnoty týchto hĺbok pohybujú v rozmedzí od 300 do 3000 m a veľmi závisí od vlastností pôdy, a iných v nej interferujúcich objektoch, ako sa bude nakoniec naozaj návratový prúd správať. Zároveň ak zoberieme do úvahy aj chybu spôsobenú samotným zjednodušením - zavedením jednotnej hĺbky a nie samostatne pre každý vodič po jeho obraze v zemi - je ťažko určiť relevantnosť tohoto rozdielu.

Po určení návratovej hĺbky a odčítaní potrebných vzdialeností (podobne ako pri Carsonovej pôvodnej metóde na Obr. 1.1), dosadíme do vzťahov:

$$Z_{ik} = R_{ik} + j\omega L_{ik} \quad [\Omega/km] \quad (1.22)$$

$$R_{ii} = R_{ii} + R_g \quad [\Omega/km] \quad (1.23)$$

$$R_{ik} = R_g \quad [\Omega/km] \quad (1.24)$$

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_g}{\xi r} \quad [H/km] \quad (1.25)$$

$$L_{ik} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_g}{D_{ik}} \quad [H/km] \quad (1.26)$$

Kde:

R_g - odpor návratovej zemnej cesty prúdu $[\Omega.m^{-1}]$

ξ - parameter lana $[-]$

Aj táto metóda nám teda poskytuje značné možnosti. Zanedbaním podmienky viacerých návratových ciest prúdu, sa vzťahy opäť zjednodušili. Tentokrát už na najjednoduchšiu možnú formu.

1.1.5 AC Rezistencia

Rezistencia 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 cesty². Podľa [10] a [9] je postup nasledovný:

$$R_g = \frac{\omega\mu_0}{8} = \pi^2 f \cdot 10^{-7} \quad [\Omega.m^{-1}] \quad (1.27)$$

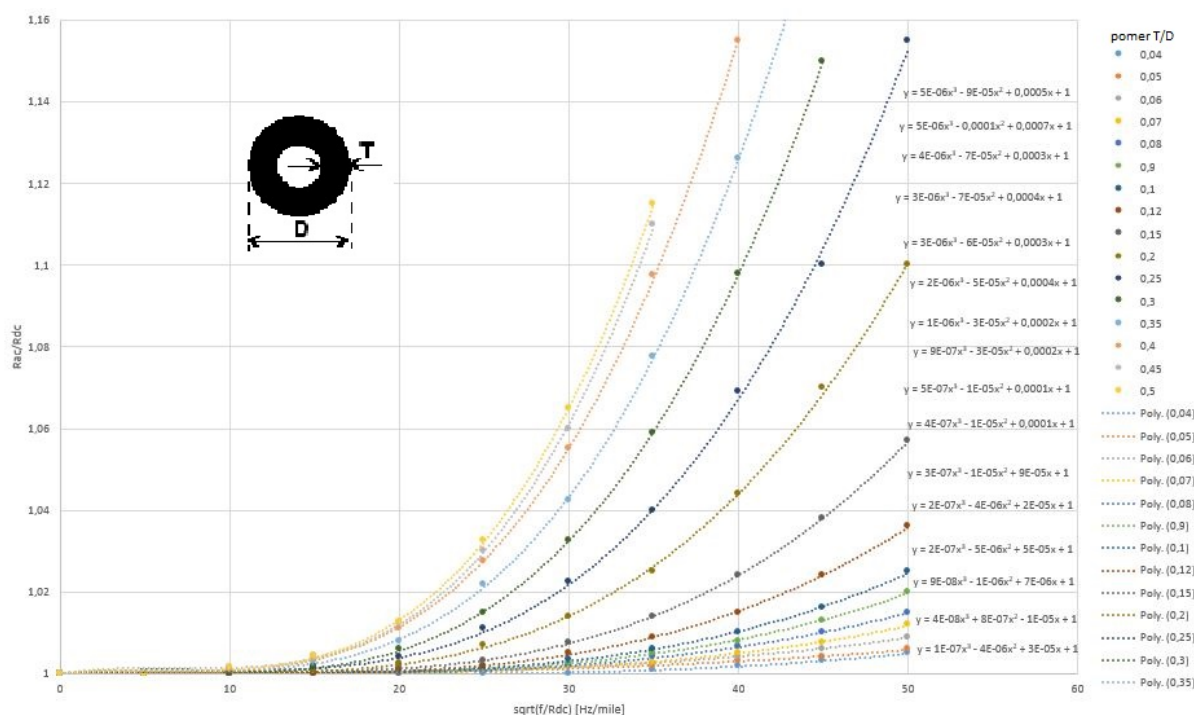
Korekcia skin efektu Ako som už spomenul, najbežnejšie uvádzaný parameter pri vodičoch je ich jednosmerný odpor. Ten sa však na výpočty parametrov pri veľkých hodnotách napätia považuje za nie úplne presný kvôli skin efektu. O to viac, pokiaľ má konštrukcia lana nepárny počet vodivých vrstiev. K priblíženiu sa reálnym prevádzkovým hodnotám môžeme pristupovať viacerými spôsobmi. Buď môžeme merať priamo na reálnom vodiči, zistiť údaje od výrobcu, alebo môžeme vychádzať z výpočtov a tabuliek, ktoré vytvoril v roku 1959 Dwight [11]. Tieto tabuľky sú praktické pre rýchle určenie percentuálnej odchýlky, ktorá sa následne eliminuje.

Vstupné parametre do tejto praktickej korekcie sú len sieťová frekvencia, jednosmerný odpor a takzvaný pomer T/D lana³. Pôvodné grafy som preniesol do modernej podoby v programe Microsoft Excel a preložil jednotlivými sériami bodov krivku so známou funkciou. Táto funkcia sa ďalej používa na korekciu jednosmerného odporu.

Podobný spôsob korekcie cez konečné pre násobenie korekčným koeficientom ponúka aj Fecko [9]. V publikácii uvádza vzťahy vyjadrené pomocou Besselových funkcií pre vodič z jedného materiálu, alebo pre vodič vinutý len vo dvoch vrstvách. Vodič vinutý v jednej vrstve má často veľký koeficient zväčšenia rezistancie vplyvom skin efektu. Pre vodiče vinuté vo viac ako dvoch vrstvách navrhuje použiť vzťahy pre duté vodiče, nakoľko dušou (jadrom lana)

²Pri sieťovej frekvencii $f = 50 \text{ Hz}$ bude odpor spätnej prúdovej cesty $R_g = 49,3 \text{ [m}\Omega.m^{-1}]$

³T - hrúbka vodivej vrstvy vodiča, D - celkový priemer vodiča



Obr. 1.3: Dwightove aproximačné krivky

preteká len 2-3% celkového prúdu.

Ostatné vplyvy na rezistanciu Všeobecne vieme rezistanciu vodičov vypočítať podľa 1.28. Rezistivitu ρ_0 [$\Omega \cdot m$] ovplyvňuje hlavne teplota vodiča. Pomocou teplotných súčiniteľov odporu vieme však tento vplyv eliminovať.

$$R = \rho_0 \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (1.28)$$

Rovnako môžeme uvažovať aj odchýlky spôsobené krútením lán, odchýlky od menovitého prierezu či nerovnomernosť prierezu vodiča a spojky. Reálne sa však uvažuje len vplyv teploty a skin efektu. Ostatné vplyvy sú zahrnuté v tabuľkách príslušných noriem STN a IEC [9].

1.2 Admitancia

Priečna admitancia úzko súvisí s kapacitami a zvodmi na vedení. Vyrátame ju spoľahlivo cez potenciálové koeficienty⁴ pomocou Kelvinovej metódy zrkadlenia [9], [12], [2]. Admitanciu vieme všeobecne zapísať ako:

⁴Inak nazývané aj Maxwellove potenciálové koeficienty

$$\bar{Y} = G + jB = G + j\omega C \quad [S/km] \quad (1.29)$$

G sa nazýva zvod - konduktancia - a vyjadruje činné straty na vedení nezávislé na veľkosti preneseného výkonu. C sa nazýva kapacitancia a vyjadruje vplyv elektrického poľa vo vodičoch na ich okolie.

1.2.1 Kapacitancia

Vplyvom premenlivého elektrického poľa vo vodiči sa indukujú prúdy nie len vo vyšetrovanom vodiči, ale aj v ostatných. Ak použijeme Kelvinovu metódu zrkadlenia, vyhneme sa problémom s frekvenciou, materiálovými konštantami vodičov a so zemou. V podstate vieme povedať, že sa jedná o totožný princíp aký použil Carson pri svojich výpočtoch impedancie (Obr. 1.1). Budem teda používať rovnakú terminológiu ako v predošlej sekcii. Vlastné a vzájomné potenciálové koeficienty vieme vypočítat nasledovne:

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad [km/F] \quad (1.30)$$

$$p_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{D'_{ik}}{D_{ik}} \quad [km/F] \quad (1.31)$$

Opäť vieme efektívne zostaviť maticu potenciálových koeficientov. Pre trojfázový jednoduchý systém bez zemných lán vyzerá takto:

$$[P] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

Následným invertovaním matice $[P]$ dostaneme maticu $[C]$, čo je už matica kapacít daného systému. Bližší matematický postup možno nájsť v prílohe diplomovej práce.

1.2.2 Konduktancia

Inak nazývaná aj zvod, sa v bežnej praxi zanedbáva úplne. Je to z dôvodu nepatrných strát ním spôsobeným. Pohybujú sa maximálne okolo 1% z celkových prevádzkových strát. Všeobecne sú straty konduktanciou spôsobené:

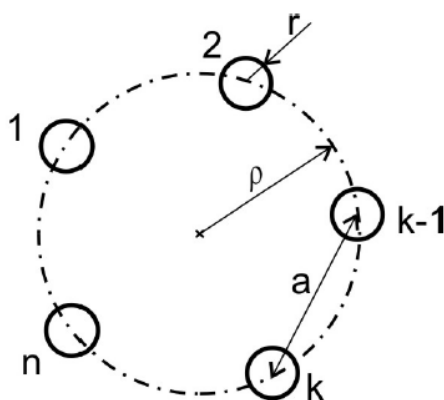
- izolačným odporom
- povrchovým znečistením izolátorov (tečie cez ne malý prúd)
- pôsobením elektrického poľa - vznik dielektrických strát na izolátoroch a samotných vodičoch
- korónou

Zároveň, je obtiažne zistiť straty z vodom v praxi. Obvykle sa určujú priamo meraním na vybudovaných vedeniach.

1.3 Zväzkový vodič

Samozrejme, vo vysokonapäťových systémoch sa používajú fázové vodiče pozostávajúce z viacerých lán. Tvoria teda zväzok vodičov, ktorý je potrebné matematicky prispôsobiť aby sme ho mohli používať ako plnohodnotný vstup do výpočtov impedancie a admitancie vedení (vid Obr. 1.4). Definujeme nasledovné veličiny:

r	- polomer vodiča	$[m]$
ρ	- polomer kružnice rozmiestnenia vodičov vo zväzku	$[m]$
a	- krok zväzku	$[m]$
n	- počet vodičov vo zväzku	$[-]$



Obr. 1.4: Znázornenie zväzkového vodiča

Ak chceme nahradiť zväzok ekvivalentným jediným vodičom, musí vytvárať rovnaké elektrické pole ako pôvodný zväzok. Jeho náhradný polomer bude:

$$r_{zv} = \sqrt[n]{nr\rho^{n-1}} \quad (1.33)$$

Kde:

$$\rho = \frac{a}{2 \sin \frac{\pi}{n}} \quad (1.34)$$

Dôsledky tejto náhrady sú markantné⁵:

$$R_{ii} \Rightarrow R_{zv}$$

$$r \Rightarrow r_{zv}$$

$$(\xi r) \Rightarrow \sqrt[n]{\xi} r_{zv}$$

Vidíme, že reálna zložka impedancie výrazne klesla použitím zväzkových vodičov. Tým je zrejmý aj ich význam, a to zmenšiť straty na vedení a zvýšiť jeho prenosovú schopnosť. Výsledné vzťahy vyzerajú teda napríklad pre n-zväzok takto (CDER⁶ metóda):

$$\bar{Z}_{ii} = \frac{R_{ii}}{n} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2(h_i + \bar{p})}{\sqrt[n]{\xi} r_{zv}} \right) \quad [\Omega/km] \quad (1.35)$$

Pre výpočet vlastných potenciálových koeficientov bude rovnica upravená nasledovne:

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{2h_i}{r_{zv}} \quad [km/F] \quad (1.36)$$

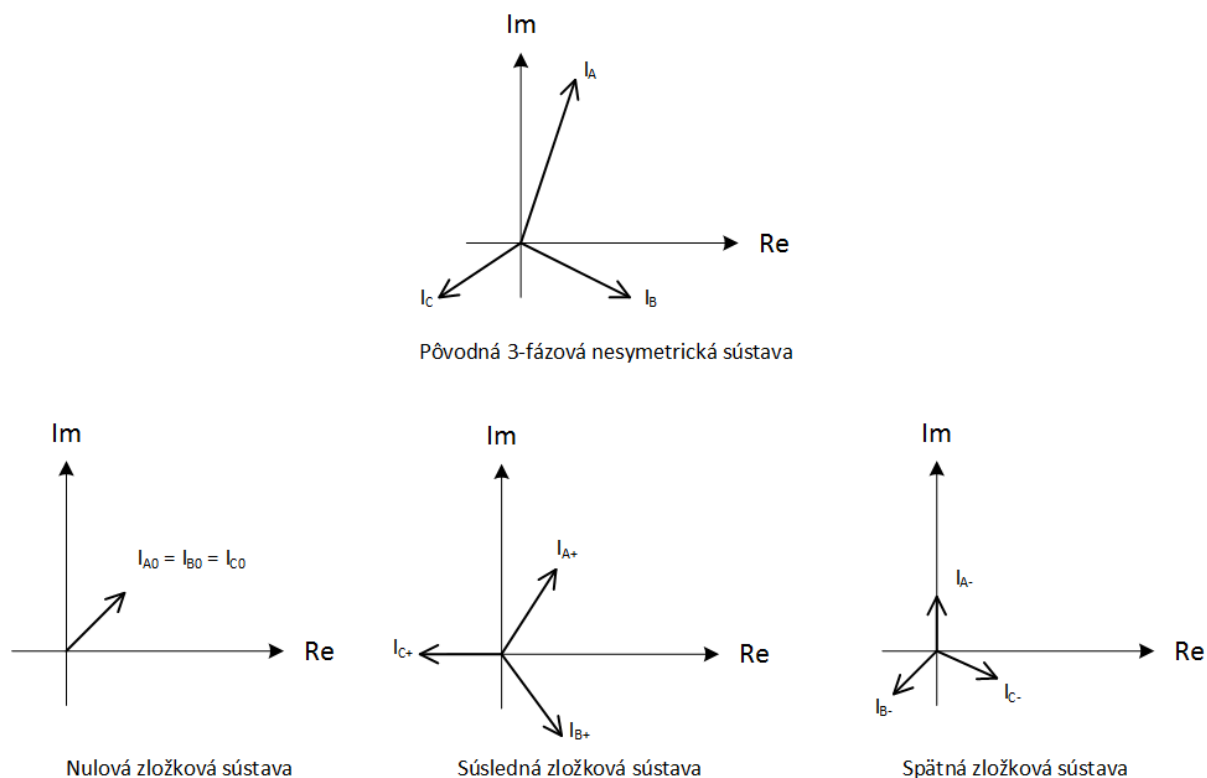
1.4 Symetrická zložková sústava

Parametre vypočítané v predchádzajúcich sekciách sú všetky vo forme vlastných a vzájomných hodnôt (medzi samotnými vodičmi). Tieto hodnoty budem pre jednoduchosť nazývať aj fázovými. Praktické hodnoty používané v energetike však dosiahneme jednoduchými transformáciami fázových matic do zložkovej sústavy.

Rozloženie viacfázovej sústavy na samostatné zložky (súslednú, spätnú a nulovú) nám umožní sledovať všetky nesymetrie v sledovanom systéme. Tento spôsob rozkladu bol uvedený v roku 1918 C. I. Fortesque v jeho článku [13], kde definoval jednotlivé sústavy ako sú znázornené na Obr. 1.5. Smer otáčania sústav je určený proti smeru otáčania hodinových ručičiek. Tieto prevody sú realizované maticovými členmi, ktoré označím ako $[T]$ a $[T]^{-1}$. Vieme ich definovať pomocou komplexného člena a , ako je vidno v rovniciach 1.37 a 1.38.

⁵ $R_{zv} = \frac{R_{ii}}{n} [\Omega]$

⁶ *The Complex Depth of Earth Return Model*



Obr. 1.5: Rozklad trojfázovej nesúmernej sústavy na zložkové sústavy

$$[\overline{T}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (1.37)$$

$$[\overline{T}]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

Kde:

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ$$

S týmito poznatkami vieme previesť ľubovoľné transformácie z jednej sústavy do druhej v prípade potreby. Príklad transformácie matice impedancie je ukázaný v rovnici 1.39.

$$[\overline{Z}_{012}] = [\overline{T}]^{-1} \cdot [\overline{Z}_{ABC}] \cdot [\overline{T}] \quad (1.39)$$

\overline{Z}_{012} je matica impedancií v zložkovej sústave, ktorá pre jednoduchý trojfázový systém vy-

zerá nasledovne:

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

Kde:

\bar{Z}_{00} = Nulová zložka impedancie

\bar{Z}_{11} = Súsledná zložka impedancie

\bar{Z}_{22} = Spätná zložka impedancie

Pre vstupné a výstupné hodnoty napätia a prúdu v jednoduchom trojfázovom systéme platia nasledovné transformácie (indexy sú analogické ako v prípade impedančnej matice):

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{T} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_{00} \\ \bar{U}_{11} \\ \bar{U}_{22} \end{bmatrix} \quad (1.41)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{T} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{00} \\ \bar{I}_{11} \\ \bar{I}_{22} \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

Pre spätnú transformáciu do fázovej podoby platia vzťahy 1.41 a 1.42. Pre príklad opäť uvádzam transformácie na matici impedancií a matici napätí v trojfázovom jednoduchom systéme.

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{T} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Z}_{012} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{T} \end{bmatrix}^{-1} \quad (1.43)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{T} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{012} \end{bmatrix} \quad (1.44)$$

Ak zoberieme do úvahy, že systémy nebývajú takmer nikdy jednoduché trojfázové, potrebujeme tieto transformačné matice upraviť do vhodnej podoby. Matice $[T]$ a $[T]^{-1}$ je potrebné rozšíriť a tým pádom prispôbiť pre daný počet systémov, koľko v danej chvíli počítame. Pre n systémov platí:

$$[\overline{T}]_n = \begin{bmatrix} [\overline{T}]_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & [\overline{T}]_2 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & [\overline{T}]_n \end{bmatrix} \quad (1.45)$$

Kde $[\overline{T}]_1 = [\overline{T}]_2 = [\overline{T}]_n = [\overline{T}]$. Analogicky vieme odvodiť aj maticu $[\overline{T}]^{-1}$. Každý člen vo vnútri takejto "poskladanej" matice je rozmeru 3x3, ako som v predchádzajúcej časti ukázal. Finálne rozmery matíc budú vždy štvorcové, čo pre príklad dvojsystému znamená rozmer 6x6 pre matice admitancie, impedancie a transformačné matice, zatiaľ čo rozmer 6x1 pre matice napätí a prúdov. Následné operácie prevádzame už s týmito rozšírenými maticami.

1.5 Redukcia zemných lán

Zemné láná nie sú v prenosovej sústave žiadnou výnimkou, práve naopak. Sú bežnou súčasťou takmer každej linky, preto je s nimi potrebné rátať pri výpočtoch elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení. Na Obr. 1.6 je uvedený ako príklad dvojsystémové vedenie s jeho obrazmi v zemi a znázornené všetky vzdialenosti vzťahnuté len na jeden fázový vodič. Každá hodnota sa zaznamená a postup pokračuje pre každý jeden vodič vrátane zemných lán. Po dorátaní budú výsledné matice vyzeráť nasledovne:

$$[P_{ABC+G}] = \begin{bmatrix} [P_{N,N}] & [P_{N,M}] \\ [P_{M,N}] & [P_{M,M}] \end{bmatrix} = [P_{M+N,M+N}] \quad (1.46)$$

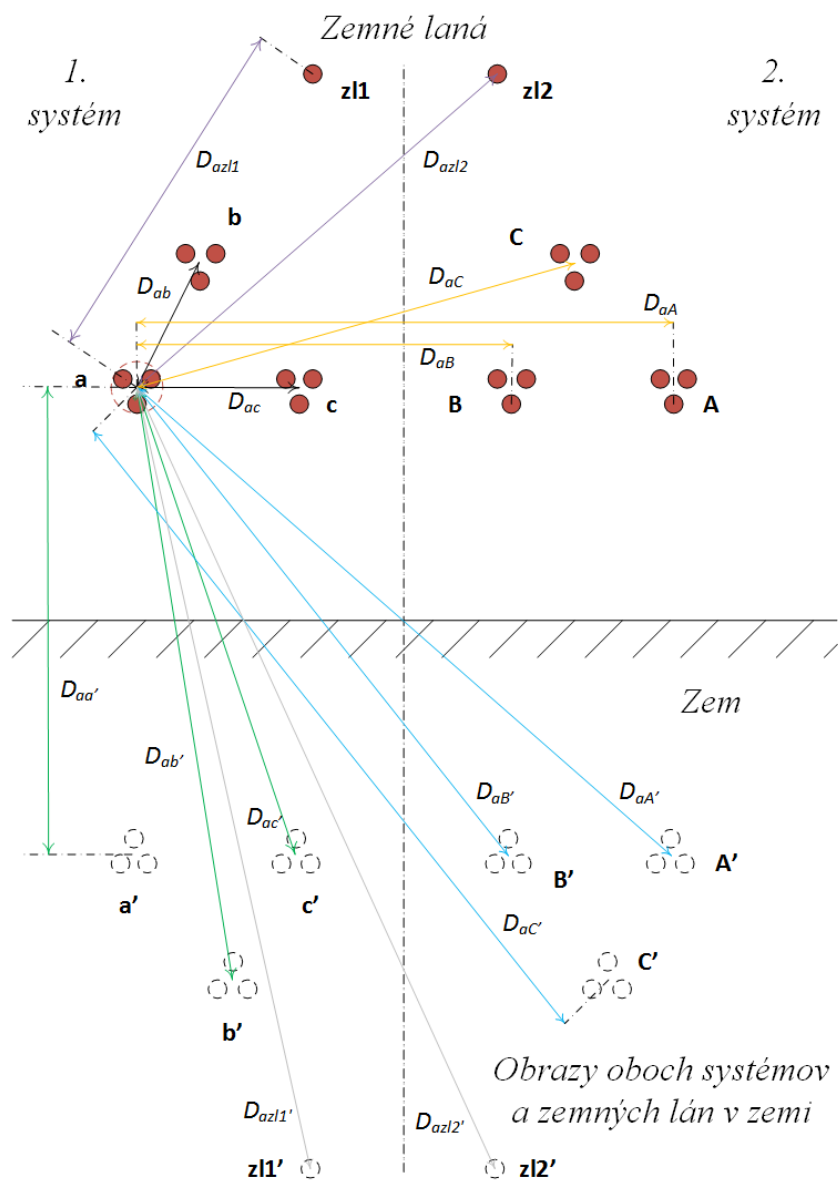
$[P_{ABC+G}]$ je matica zahŕňajúca aj zemné láná. Vieme ju rozdeliť na podcelky $[P_{N,N}]$, $[P_{N,M}]$, $[P_{M,N}]$ a $[P_{M,M}]$. Index M označuje počet počet zemných lán a index N počet fázových vodičov. Zároveň prezentujú aj rozmery podcelkov.

Pre ďalší výpočet je potrebné, aby mali matice štvorcový tvar, konkrétne rozmeru $N \times N$. Musíme teda upraviť veľkosť matice bez zanedbania vplyvu zemných lán. Tento proces sa nazýva Kronova Redukcia [3]. Ak uvážime, že zemné láná sú uzemnené, môžeme predpokladať že ich napätie voči zemi je nulové. Vzt'ahom je táto redukcia vyjadrená ako:

$$[P_{ABC}] = [P_{N,N}] - [P_{N,M}] \cdot [P_{M,M}]^{-1} \cdot [P_{M,N}] \quad (1.47)$$

Výslednú maticu $[P_{ABC}]$ budeme označovať ako redukovanú. Kronovu redukciu v prípade

impedancie aplikujeme priamo na maticu fázových impedancií. V prípade admitancie aplikujeme tento postup už v štádiu potenciálových koeficientov nakoľko zvod štandardne zanedbávame z dôvodu jeho veľmi nízkych hodnôt. Získané formy sú finálne a použiteľné na akékoľvek ďalšie výpočty či analýzy.



Obr. 1.6: Schéma dvojsystémového vedenia so zväzkovými vodičmi a zemnými lanami so vzdialenosťami vzťahnutými na jeden fázový vodič

Kapitola 2

Nesymetrické vedenia

Prenosové linky (oproti napríklad distribučným linkám) vedia z celej elektrizačnej sústavy preniesť najväčší výkon. Je preto potrebné, aby boli ich elektrické parametre čo najsymetrickejšie ako je to možné. Symetrické parametre na vedení zaručia symetrické výstupné hodnoty napätia a prúdu pri ich symetrických vstupných hodnotách. Každá malá odchýlka na základných pilieroch sústavy sa bez jej kompenzácie bude šíriť do celej sústavy. Každá nepresnosť znamená zvýšené straty tepelné či elektrické. To znamená zvýšené náklady na prevádzku, či možné poruchy spotrebičov pripojených do nesymetrickej siete.

Takéto vedenia nemajú jednotlivé prevádzkové indukčnosti rovnaké, teda aj ideálne symetrickým zaťažením vznikajú na konci nesymetrické napätia a prúdy. Tento vplyv je závislý od veľkosti zaťaženia, čiže prenášaného výkonu na linke. Vzniknutá nesymetria na konci vedenia sa dá odstrániť, alebo dostatočne eliminovať viacerými spôsobmi. Jedným z najefektívnejších je transpozícia vedenia.

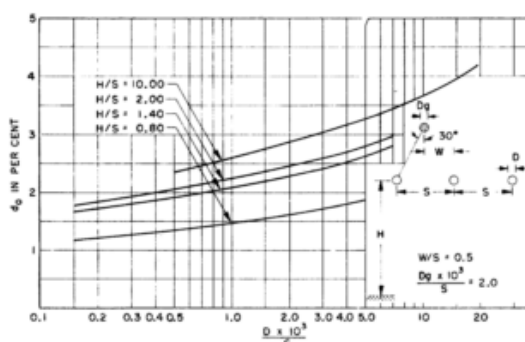
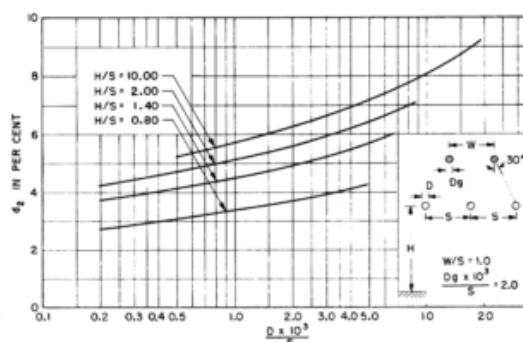
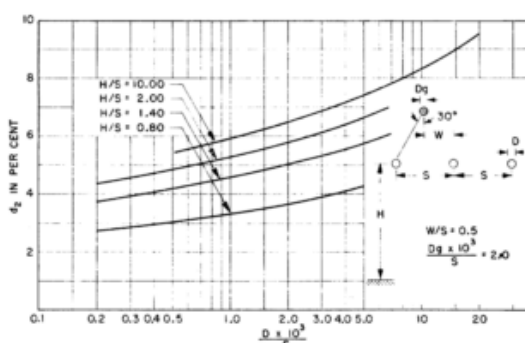
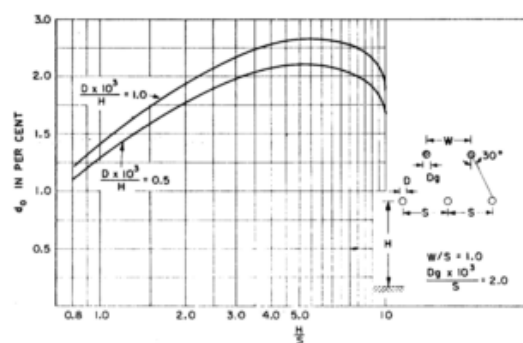
2.1 Kritériá potreby kompenzácie nesymetrie na vonkajších elektrických vedeniach

Samotné kritériá symetrizácie vedení sa značne líšia v závislosti od krajiny, či časového obdobia. Vo všeobecnosti neexistuje pravidlo, aká najdlhšia môže byť netransponovaná linka bez výrazných odchýlok na jej konci.

V Rusku momentálne platí pravidlo, že vedenie dlhšie ako 100 km v napäťovej hladine

110 kV a viac má byť transponované aspoň čiastočne. Zároveň jeden transpozičný úsek nemá byť dlhší ako 24, respektíve 48 km [14]. Vedenia nad 300 km musia byť transponované úplne. Vo Veľkej Británii sa momentálne linky takmer netransponujú, vďaka už dostatočne stabilnej sieti (70 - 90% dvojsystémových vedení je už transponovaných a zvyšok, ktorý tvorí približne 200 km, by mohol byť) [14]. Systémy pod 132 kV sa nespomínajú v súvislosti s transpozíciou vôbec. Čo sa týka distribučnej sústavy všeobecne, linky sú kratšie, väčšinou bez transpozície a vplyv nesymetrie vzhľadom na prenášaný výkon na nej sa neberie do úvahy.

Môžeme rozlišovať prúdovú alebo napäťovú nesymetriu na vedení. V minulosti sa používali rôzne faktory nesymetrie, ktoré boli vynášané do grafov, ktoré boli praktické pre projektantov pri návrhu nových liniek. Tieto faktory spočívali v pomerných hodnotách napätí či prúdov v zložkových sústavách. Príklad takýchto kriviek uvádza Gross v jeho článku z roku 1968 [15] na Obr. 2.1.

Fig. 3. Ground displacement. H/S vs. $D \cdot 10^3/S$.Fig. 7. Negative sequence unbalance. H/S vs. $D \cdot 10^3/S$.Fig. 4. Negative sequence unbalance. H/S vs. $D \cdot 10^3/S$.Fig. 8. Ground displacement. $D \cdot 10^3/S$ vs. H/S .

Obr. 2.1: Krivky popisujúce rozličné faktory nesymetrie pre konkrétne geometrie vedení

V Českej Republike platí interná norma ČEPS TN/62/2012 - *Koncepcie technické infrastruktúry PS*, ktorá definuje podmienky kompenzácie vedení kvôli ich nesymetrii nasledovne:

U každého nového vedení musí být v rámci předprojektové přípravy proveden výpočet nesymetrie vedení, který bude vycházet z navrhovaných parametrů vedení (konfigurace vodičů, průřez vodičů apod.)

- *v případě, že výpočet nesymetrie vedení ukáže výsledek nižší než 5% podílu trojnásobku nulové složky proudu a sousledné složky proudu, není nutné provádět žádná opatření ke snížení nesymetrie vedení*
- *v případě, že výpočet nesymetrie vedení ukáže výsledek vyšší než 5% podílu trojnásobku nulové složky proudu a sousledné složky proudu, vyžádá si zpracovatel konzultaci s oddělením 16162 za účelem posouzení přípustnosti zvýšené hodnoty nesymetrie pro dané vedení, nebo stanovení dalších opatření ke snížení předpokládané nesymetrie vedení (transpozice fázových vodičů v trase)*

Štúdie prevádzané v tomto ohľade však vychádzajú z celkového stavu siete v danom momente. Ich oficiálne výsledky zverejňujú nesymetriu podľa tejto normy na začiatku aj na konci vedenia [16]. Dokonca rozdiel nesymetrie na konci a na začiatku vedenia je výrazne menší. V tomto prípade konkrétne 0,03% z celkových konečných hodnôt 1,57 - 1,58% (hodnoty pri rozdielnych zaťaženiach). Indikuje to fakt, že transpozícia vedení (celkovo táto interná norma) je omnoho viac závislá od momentálneho stavu siete, jej výkonových tokov a nesúmerných zaťažení v nej ako od samotných nesymetrií daného vedenia. V práci od Liu na Manchesterskej Univerzite [14] je dokonca doporučené zanedbať vplyv nesymetrie vedení pri počítaní veľkých sietí a ustálených stavoch v nich. Samotné pravidlo ČEPS však opodstatnené určite je. V matematickom zápise ho vieme zapísať aj ako:

$$\frac{3I_0}{I_1} \cdot 100 \leq 5\% \quad (2.1)$$

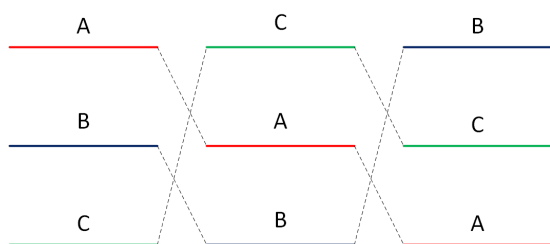
Je to určená bezpečná hranica prevádzkovania daného vedenia bez rizika poškodenia strojov, či iných porúch.

2.1.1 Transpozícia vonkajších elektrických vedení

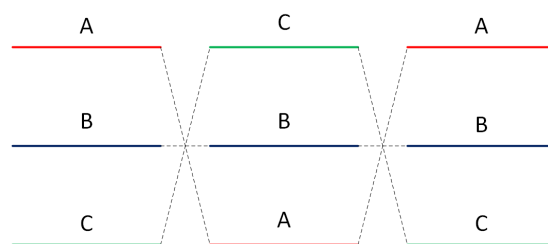
Metódou transpozície zaručíme, že celková jeho celková indukčnosť sa bude rovnať strednej hodnote indukčnosti všetkých vodičov systému. Každý vodič zaujme v ideálnom prípade v rovnakej dĺžke všetky polohy (pri trojfázovom systéme tri), ktoré sú v danom systéme možné. Eliminuje sa tým rozdielne elektromagnetické pôsobenie vodičov na ostatné vodiče a zároveň

značne zjednoduší výpočet elektrických parametrov linky. Tieto zjednodušené vzťahy síce vychádzajú z uvedených pôvodných výpočtových metód, no kvôli markantným zjednodušeniam sú výsledky skreslené pri reálnych vedeniach. Vybrané vzťahy sa nachádzajú v Appendixe B.

Na Obr. 2.2 je uvedený schéma ideálnej transpozície na trojfázovom vedení ľubovoľnej dĺžky a rovnakej geometrie na celej dĺžke vedenia. Na takéto prípady sú vhodné práve rovnice spomínané vyššie. Všetky už aj v prípade len čiastočnej symetrizácie ako na Obr. 2.3 sa dopúšťame chyby vo výsledkoch.



Obr. 2.2: Príklad dokonalej trojfázovej transpozície



Obr. 2.3: Príklad čiastočnej trojfázovej transpozície

2.1.2 Ostatné spôsoby kompenzácie na vedeniach

Elektrické parametre vieme kompenzovať aj inak ako transpozíciou vedenia. Zaradením konkrétnych prvkov do systému ovplyvňujeme potrebné parametre. Modernú verziu tejto technológie nazývame aj *FACTS - Flexible AC Transmission System*. Pomocou nej vieme rozšíriť možnosti bežnej linky, či čiastočne ovládať výkon na nej. Medzi prvky FACTS patria:

- Static Shunt Compensators
- Static Series Compensators
- Combined Compensators

Static Shunt Compensators kompenzujú vedenia v paralelnom zapojení a regulujú jalový výkon na vedení. Fungujú na princípe regulovania prúdu v určenom bode.

Static Series Compensators kompenzujú vedenia v sériovom zapojení. Efektívnejšie než paralelné zapojenia v ovládaní prúdu, tým pádom aj výkonu. PST - *Phase Shifting Transformer*, či PAR - *Phase Angle Regulator* vieme zaradiť do tejto kategórie.

Combined Compensators už podľa názvu kombinujú sériovú a paralelnú kompenzáciu. Môžeme sem zaradiť UPFC - *Unified Power Flow Controller* či IPFC - *Interline Power Flow Control*.

Všetky detaily prvkov vyššie spomenutých možno nájsť napríklad aj v tomto dokumente zo Švajčiarskeho laboratória EEH [17].

Kapitola 3

Návrh výpočtu prúdovej nesymetrie vedenia

V tejto kapitole navrhujem metódu riešenia prúdovej nesymetrie na ľubovoľnom vedení podľa internej normy ČEPS TN/62/2012. Považujem ju za najdôležitejšiu, pretože sa nás, ako prenosovej sústavy Slovenskej Republiky, týka najviac. Posúdenie tohoto kritéria môže ovplyvniť výrazne cenu projektu čo sa konkrétne týka rozdielu ceny transpozičných a bežných stožiarov.

3.1 Vstupné hodnoty do výpočtu

Pri tomto teoretickom postupe uvažujem plne symetrické zaťaženie a budem sa zameriavať len na príspevok nesymetrie od samotného vedenia. Ako som už spomenul skôr, môžeme očakávať aj veľmi malé hodnoty sledovaného parametra. Na začiatok použijeme ľubovoľnú metódu pre výpočet elektrických parametrov v zvolenej geometrii úseku elektrického vedenia. Nevyhnutné sú však pri tejto štúdii aj nasledovné vstupné veličiny:

- $\left[\overline{U}_{ABC-1}\right]$ = vstupné fázové napätia $[V]$
- $\left[\overline{I}_{ABC-1}\right]$ = vstupné fázové prúdy $[A]$
- l = dĺžka počítaného úseku $[km]$

Vstupné hodnoty napätia a prúdu sú zadané v maticovej podobe¹, ktorej veľkosť závisí od počtu fáz na vedení. Vidíme teda, že vieme ľubovoľne prispôbiť systém aj na nesymetrické

¹Ďalej všetky hranaté zátvorky $[\]$ budú označovať maticu.

vstupné podmienky pokiaľ by to bolo nutné. Tieto fázové matice ďalej transformujeme do matíc v zložkových sústavách (nulovej, súslednej a spätnej) nasledovne:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{012-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{T} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{ABC-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_{00-1} \\ \bar{U}_{11-1} \\ \bar{U}_{22-1} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{012-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{T} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{ABC-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{00-1} \\ \bar{I}_{11-1} \\ \bar{I}_{22-1} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Týmto krokom sme stanovili všetky potrebné vstupné hodnoty do výpočtu.

3.2 Náhradné schémy prenosového obvodu

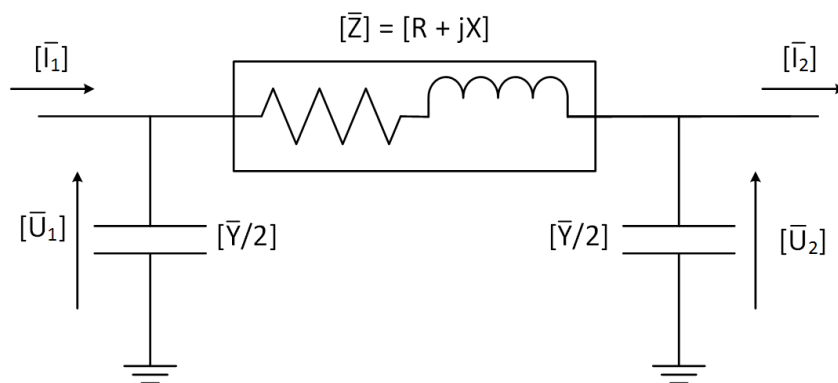
Postupujeme zadenovaním matice $\begin{bmatrix} \overline{ABCD} \end{bmatrix}$ ako:

$$\begin{bmatrix} \overline{ABCD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \bar{B} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \bar{C} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \bar{D} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Kde vnútorné matice $\begin{bmatrix} \bar{A} \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} \bar{B} \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} \bar{C} \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} \bar{D} \end{bmatrix}$ môžu byť definované pomocou rozdielnych náhradných schém prenosového obvodu. V nasledujúcej časti ukážem, ako možno jednoducho vypočítať tieto koeficienty pre jednu fázu, respektíve pre jednu zo zložkových sústav. Ak však uvažujeme, že všetky naše doterajšie všeobecné výpočty boli realizované tak, aby sa z výsledkov dali zostaviť matice, je rozumné uvažovať aj v tomto prípade s maticovým počtom ako konečným riešením. Pre jednoduchosť budem tentokrát uvádzať len zjednodušenú formu zápisu koeficientov pri zachovaní znázornenia reálnych vstupných matíc do systému v konečnom výpočte. Najčastejšie náhradné schémy sú teda nasledovné:

3.2.1 II-článok

Náhradná schéma pomocou II článku je zobrazená na Obr. 3.1. Hodnoty admitancie Y a impedancie Z sú už prepočítané na konkrétnu dĺžku vedenia. Po aplikovaní Kirchhoffových zákonov vieme potom vyjadriť potrebné koeficienty pre jednu fázu podľa rovnice 3.4.

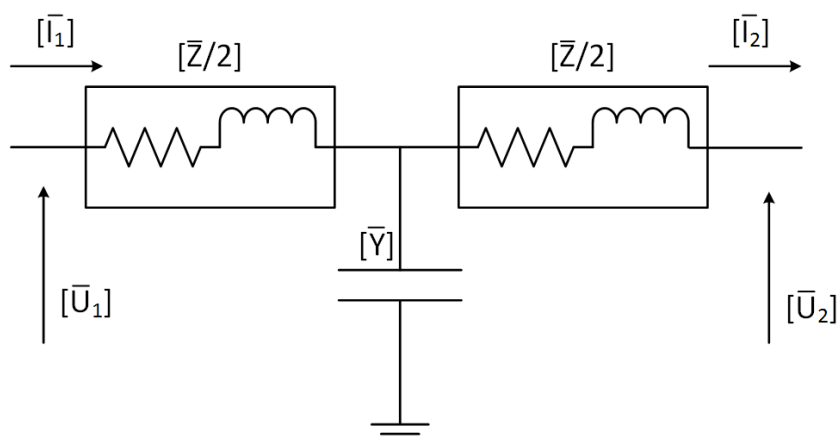

 Obr. 3.1: Náhradná schéma prenosového obvodu pomocou Π článku

$$\begin{aligned}\bar{A} &= \bar{D} = \left(\frac{\bar{Y} \bar{Z}}{2} + 1 \right) \\ \bar{B} &= \bar{Z} \\ \bar{C} &= \bar{Y} \left(\frac{\bar{Y} \bar{Z}}{4} + 1 \right)\end{aligned}\tag{3.4}$$

Presnosť Π -článku je však limitovaná dĺžkou vedenia. Jeho použitie preto zvažujeme len do približne 250 km.

3.2.2 T -článok

Podobne ako pri predchádzajúcom modeli, využijeme Kirchhofove zákony pre formulovanie výsledných vzťahov. Názorné zobrazenie sa nachádza na Obr. 3.2 a výsledné rovnice koeficientov možno vidno v rovnici 3.5.

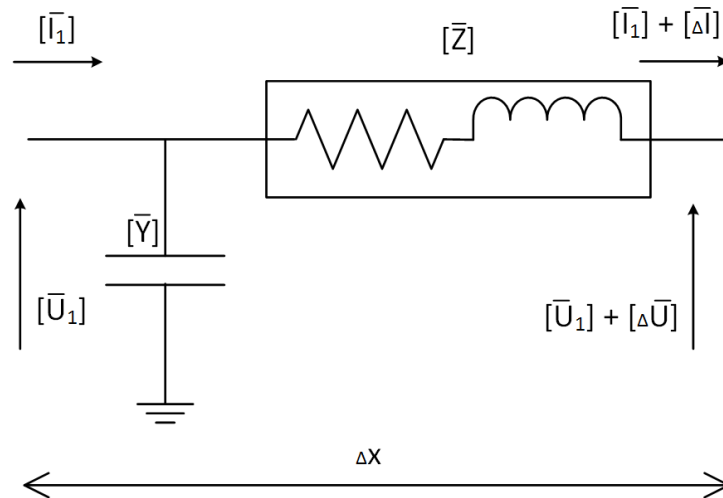

 Obr. 3.2: Náhradná schéma prenosového obvodu pomocou T článku

$$\begin{aligned}
 \bar{A} &= \bar{D} = \left(\frac{\bar{Y} \bar{Z}}{2} + 1 \right) \\
 \bar{B} &= \bar{Z} \left(\frac{\bar{Y} \bar{Z}}{4} + 1 \right) \\
 \bar{C} &= \bar{Y}
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Zaujímavé je pozorovať analogické zmeny v týchto vyjadreniach medzi Π a T článkom. Koeficienty \bar{A} a \bar{D} sa nezmenili, zatiaľ čo \bar{B} a \bar{C} si ako keby "vymenili" pozície so zámenou impedancie a admitancie. Ak sa na to pozrieme s nadhľadom z pohľadu matice $[\overline{ABCD}]$, tak diagonála ostáva v oboch prípadoch rovnaká. Pri T -článku treba na koniec rovnako podotknúť, že výpočet na dlhých elektrických vedeniach taktiež nie je presný.

3.2.3 Náhradný model s rozloženými parametrami

Za najpresnejší možný model považujeme náhradný obvod s rozloženými parametrami, zobrazený na Obr. 3.3.



Obr. 3.3: Náhradná schéma prenosového obvodu pomocou rozložených parametrov

Vedenie je celkovo dlhé l km skladajúce sa z množstva malých úsekov Δx . Na týchto úsekoch je prúdový aj napätový rozdiel $\Delta \bar{U}$ a $\Delta \bar{I}$. Pomocou týchto predpokladov a použitím telegrafných rovníc sa vieme ďalšími úpravami dopracovať k nasledovným vzťahom na výpočet koeficientov \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} a \bar{D} :

$$\begin{aligned}\overline{A} &= \overline{D} = \cosh(\gamma l) \\ \overline{B} &= \overline{Z}_C \sinh(\gamma l) \\ \overline{C} &= \frac{\sinh(\gamma l)}{\overline{Z}_C}\end{aligned}\tag{3.6}$$

Kde:

$$\begin{aligned}\overline{Z}_C &= \sqrt{\frac{\overline{Z}}{\overline{Y}}} \\ \gamma &= \sqrt{\overline{Z} \overline{Y}}\end{aligned}\tag{3.7}$$

Parameter \overline{Z}_C nazývame aj charakteristická impedancia a γ konštanta šírenia. Pri tomto druhu výpočtu musíme už realizovať mierne zložitejšie výpočty ako napríklad odmocninu z komplexného čísla, či využívať komplexné hyperbolické funkcie. O to zložitejšia situácia nastáva, keď v konečných vzťahoch uvažujeme s celými komplexnými maticami a tieto operácie musíme vykonávať na nich. Prehľad použiteľných metód na takéto operácie sa nachádza v prílohe.

3.2.4 Porovnanie presnosti náhradných modelov vedenia

Keďže prvé dva náhradné obvody považujeme za obdobne presné, stačí porovnať len jeden s tým teoreticky najpresnejším. Použijem existujúce rovnice pre Π -článok, avšak s následnými úpravami:

$$\begin{aligned}\overline{A} &= \overline{D} = \left(\frac{\overline{Y}' \overline{Z}'}{2} + 1 \right) \\ \overline{B} &= \overline{Z}' \\ \overline{C} &= \overline{Y}' \left(\frac{\overline{Y}' \overline{Z}'}{4} + 1 \right)\end{aligned}\tag{3.8}$$

Kde:

$$\overline{Z}' = \overline{Z}_C \sinh(\gamma l) = \frac{\overline{Z}}{\overline{Y}} \sinh(\gamma l) = \overline{Z} \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l}\tag{3.9}$$

Zároveň vyjadríme z rovnice 3.10 aj $\frac{\overline{Y}'}{2}$.

$$\cosh(\gamma l) = \frac{\bar{Y}' \bar{Z}'}{2} + 1 = \frac{\bar{Y}'}{2} \bar{Z}_C \sinh(\gamma l) + 1 \quad (3.10)$$

$$\frac{\bar{Y}'}{2} = \frac{1}{\bar{Z}_C} \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{\sinh(\gamma l)} = \frac{1}{\bar{Z}_C} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \frac{\bar{Y}}{2} \frac{\tanh(\frac{\gamma l}{2})}{(\frac{\gamma l}{2})} \quad (3.11)$$

Pre malé vzdialenosti l sa $\sinh(\gamma l) = (\gamma l)$ a zároveň $\tanh(\frac{\gamma l}{2}) = (\frac{\gamma l}{2})$, čo znamená že v našom prípade bude platiť $\bar{Z}' = \bar{Z}$ a $\bar{Y}' = \bar{Y}$. Je tu jasne vidno, že so zväčšujúcou sa vzdialenosťou rozdiel výsledných elektrických veličín rovnako zväčšuje. V tabuľke 3.1 uvádzam takýto príklad pre typické vonkajšie elektrické vedenie prevzaté z [18]:

$l[km]$	$\bar{Z}[\Omega]$	$\bar{Y}[S]$	$\bar{Z}'[\Omega]$	$\bar{Y}'[S]$
100	52,41 $\angle 79^\circ$	3,17.10 ⁻⁴ $\angle 90^\circ$	52,27 $\angle 79^\circ$	3,17.10 ⁻⁴ $\angle 89,98^\circ$
250	131,032 $\angle 79^\circ$	7,93.10 ⁻⁴ $\angle 90^\circ$	128,81 $\angle 79,2^\circ$	8.10 ⁻⁴ $\angle 89,9^\circ$
500	262,064 $\angle 79^\circ$	1,58.10 ⁻³ $\angle 90^\circ$	244,61 $\angle 79,8^\circ$	1,64.10 ⁻³ $\angle 89,6^\circ$

Tabuľka 3.1: Porovnanie presnosti náhradných článkov pri zväčšujúcej sa dĺžke vedenia

$l[km]$	$\Delta \bar{Z} [\%]$		$\Delta \bar{Y} [\%]$	
	<i>Real</i>	<i>Imag</i>	<i>Real</i>	<i>Imag</i>
100	0,27	0,00	0,00	0,02
250	1,73	0,25	0,88	0,11
500	7,14	1,00	3,66	0,45

Tabuľka 3.2: Percentuálne porovnanie presnosti náhradných článkov pri zväčšujúcej sa dĺžke vedenia

3.3 Konečné vzťahy

Po výpočte matice $[\overline{ABCD}]$ a príslušných transformáciách do zložkových sústav či redukcii zemných lán, dostaneme konečný vzťah pre výpočet potrebných napätí a prúdov na konci vedenia², pomocou ktorých vieme realizovať výpočet jeho faktoru nesymetrie.

²V tomto prípade uvedený príklad jednoduchého trojfázového vedenia

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{00-1} \\ \bar{U}_{11-1} \\ \bar{U}_{22-1} \\ \bar{I}_{00-1} \\ \bar{I}_{11-1} \\ \bar{I}_{22-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{00} & \bar{A}_{01} & \bar{A}_{02} & \bar{B}_{00} & \bar{B}_{01} & \bar{B}_{02} \\ \bar{A}_{10} & \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} & \bar{B}_{10} & \bar{B}_{11} & \bar{B}_{12} \\ \bar{A}_{20} & \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} & \bar{B}_{20} & \bar{B}_{21} & \bar{B}_{22} \\ \bar{C}_{00} & \bar{C}_{01} & \bar{C}_{02} & \bar{D}_{00} & \bar{D}_{01} & \bar{D}_{02} \\ \bar{C}_{10} & \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{D}_{10} & \bar{D}_{11} & \bar{D}_{12} \\ \bar{C}_{20} & \bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} & \bar{D}_{20} & \bar{D}_{21} & \bar{D}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_{00-2} \\ \bar{U}_{11-2} \\ \bar{U}_{22-2} \\ \bar{I}_{00-2} \\ \bar{I}_{11-2} \\ \bar{I}_{22-2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

V skrátenom zápise vyjadrené aj ako:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{012-1} \\ \bar{I}_{012-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{012} & \bar{B}_{012} \\ \bar{C}_{012} & \bar{D}_{012} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_{012-2} \\ \bar{I}_{012-2} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Aby sme si zjednodušili výpočet, prepíšeme rovnicu 3.13 nasledovne:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{012-2} \\ \bar{I}_{012-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{012} & -\bar{B}_{012} \\ -\bar{C}_{012} & \bar{D}_{012} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_{012-1} \\ \bar{I}_{012-1} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Vyrátaním tohoto súčinu matíc dostávame výsledné hodnoty napätia a prúdu na konci sledovaného vedenia, respektíve v zadanej dĺžke l od jeho začiatku. V terminológii použitej v rovnici 3.12 vieme nakoniec jednoducho zapísať výpočet faktoru nesymetrie podľa normy ČEPS TN/62/2012 ako:

$$nesym = \frac{3I_{00-2}}{I_{11-2}} 100 \quad \left(\leq 5\% \right) \quad (3.15)$$

Všetky hodnoty uvedené vo vzťahu 3.15 sú absolútne hodnoty prúdu (nulovej či súslednej zložky). Napriek tomu, že táto interná norma stanovuje hodnotenie len podľa absolútnych hodnôt komplexných výsledkov, neznamená to že nevieme sledovať aj fázový posun jednotlivých prúdov či napätí na vedení. Vidíme teda, že tento postup má značne široký záber pôsobnosti a môže slúžiť aj na iné štúdie na linke.

Kapitola 4

Program na výpočet elektrických parametrov VEV

Ako súčasť diplomovej práce som vytvoril program *ELPAM MultiGeo* počítajúci elektrické parametre netransponovaných vonkajších elektrických vedení s možnosťou zadania viacerých geometrických usporiadaní vodičov (zmena typu stožiara na trase) s určitou dĺžkou. Praktické požiadavky na neho boli stanovené ako jednoduché zadávanie vstupných údajov, prenosnosť, nízke požiadavky na výpočtový výkon, čo najjednoduchší pohyb v "menu" a samozrejme čo najpresnejšie dosiahnuté výsledky. Počas procesu jeho tvorby boli dôležité kroky v jeho funkcionalite konzultované priamo vo firme SAG Elektrovod, a.s. aby sa zaručilo v čo najväčšej miere splnenie všetkých vyššie uvedených kritérií.

4.1 Popis programu

Využitím teórie výpočtu elektrických parametrov v prvej kapitole som sa rozhodol pre využitie metódy *CDER*¹. Táto technika vykazuje najmenší stupeň náročnosti výpočtov a zároveň pre nízke frekvencie² nestráca na presnosti oproti klasickej Carsonovej metóde. Ako vývojové prostredie som zvolil **NetBeans IDE**³. Jeho užívateľský interface je znázornený na Obr. 4.1. Ako programovací jazyk som si zvolil **Fortran90** s kompilerm **gfortran**. Zároveň je potrebné mať nainštalovaný **Java SE Development Kit 7**⁴. Spomenuté súčasti sú v licencií opensource

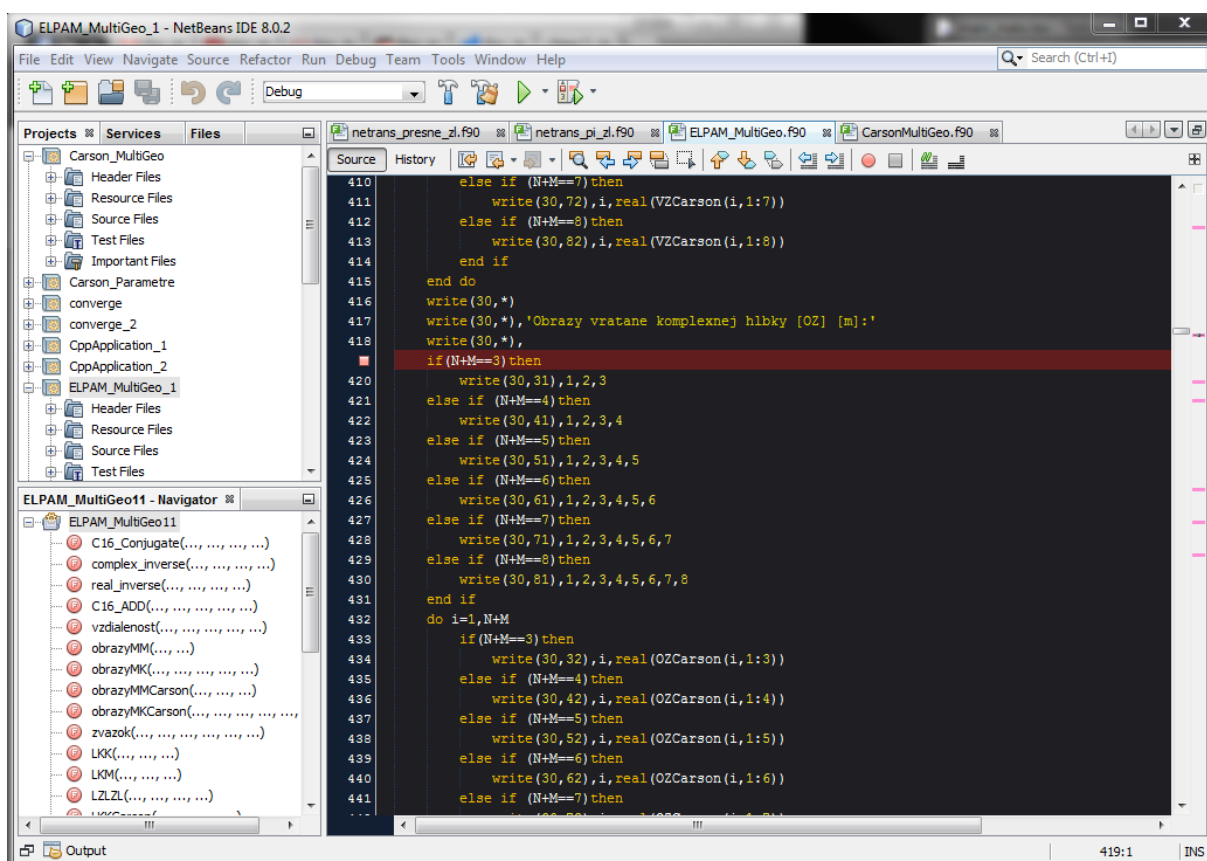
¹Complex Depth Earth Return - metóda uvažujúca návratovú cestu prúdu v zemi vrátane komplexnej hĺbky

²Sieťovú frekvenciu $f = 50/60 \text{ Hz}$ považujeme stále za nízku

³Integrated Development Environment

⁴Posledná bezplatná verejne dostupná verzia

pre všetky použitia a je možné ich bezplatne stiahnuť a nainštalovať z ich oficiálnych webových stránok⁵. Samotné vývojové prostredie je pri písaní programu veľmi pohodlné a umožňuje užívateľovi jednoducho pristupovať k jeho rozličným funkciám. Obzvlášť užitočné je okno znázorňujúce všetky funkcie obsiahnuté v danom programe, možnosť pridávania takzvaných *Break Point*-ov⁶ či už klasické kontrolovanie syntaxu a bezproblémové celkové nastavenia jednotlivých projektov.



Obr. 4.1: Užívateľský interface Netbeans IDE verzia 8.0.2

Výsledný program počíta:

- Impedanciu a Admitanciu vedenia (tým pádom aj Induktanciu, Reaktanciu a Susceptanciu) vo všetkých zložkových a fázových sústavách
- Konštanty šírenia $\sqrt{\ln \alpha}$ a β na vedení
- Charakteristickú Impedanciu vedenia
- Prirodzený výkon vedenia

⁵www.netbeans.org, www.oracle.com, www.gcc.gnu.org

⁶V režime Debug sa tu program pozastaví a objaví sa zoznam používaných premenných

Všetko je možné vypočítať pre 1 až 10 rôznych geometrických štruktúr v definovaných dĺžkach každej takejto sekcie pre maximálne dvojsystémové vedenie s dvoma zemnými lanami. Po každom výpočte jednotlivej sekcie sa zapíšu vypočítané elektrické parametre do textového súboru vo forme matic. Po vypočítaní všetkých takýchto úsekov, program na konci vypočíta vážený priemer elektrických parametrov vzťahnutý k jednotlivým dĺžkam samostatných sekcií. Získame tak najpresnejšie možné teoretické hodnoty elektrických parametrov celej linky. Tie sú opätovne zapísané na úplný koniec výstupného súboru "output.txt". Taktiež sa vypíšu na spustenej konzole. Z týchto konečných hodnôt sa následne vyrátajú všetky skúmané veličiny spomenuté vyššie.

4.2 Vstupy a výstupy

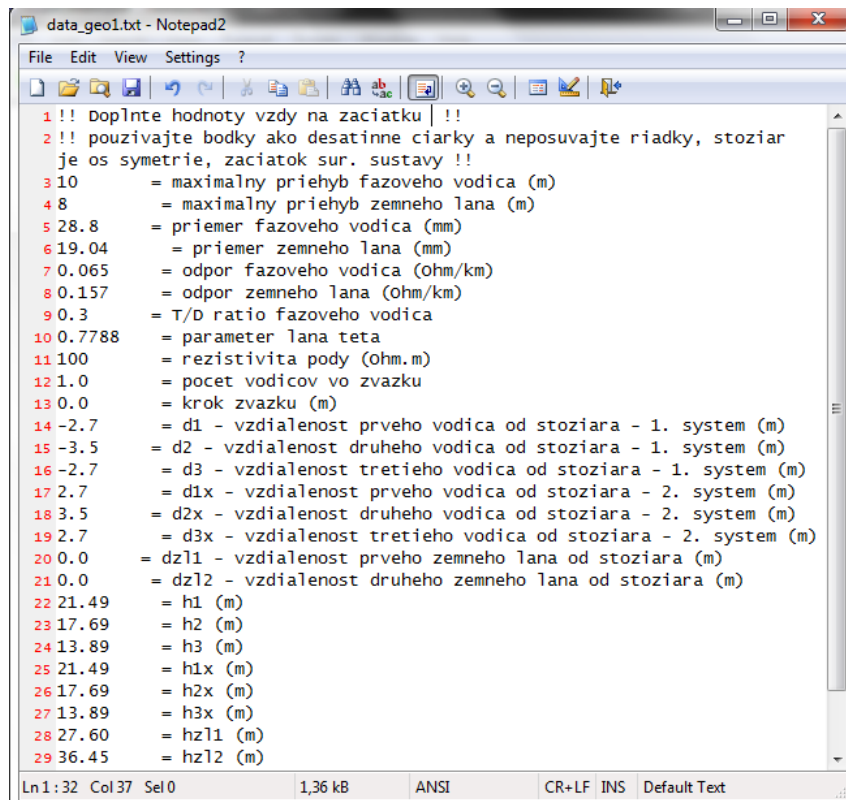
ELPAM MultiGeo má dva druhy vstupov, volieb, ktoré vieme realizovať buď cez textové súbory alebo až po sputení programu.

4.2.1 Zadávanie vstupných údajov do súborov

Ako hlavné vstupy do programu slúžia textové súbory, ktoré sa musia nachádzať v rovnakom priečinku ako je aj .exe aplikácia. Editovaním týchto súborov vieme upraviť:

- geometriu stožiaru
- elektrické vlastnosti použitých vodičov a ich maximálne priehyby
- dĺžku vedenia
- nominálnu hodnotu napätia na vedení
- počet vodičov vo zväzku a krok zväzku
- rezistivitu pôdy

Príklad zadávania vstupných hodnôt do takéhoto súboru možno vidno na Obr. 4.2. Nesprávnym zadáním týchto údajov dosiahneme nezvratne zlý výsledok výpočtu, je preto potrebné dobre skontrolovať všetky zadané hodnoty aj niekoľko krát.



```

1 !! Doplňte hodnoty vždy na začiatku !!
2 !! používajte bodky ako desatinné čiarky a neposuvajte riadky, stoziar
   je os symetrie, začiatok sur. sústavy !!
3 10      = maximálny priehyb fazového vodica (m)
4 8       = maximálny priehyb zemného lana (m)
5 28.8    = priemer fazového vodica (mm)
6 19.04    = priemer zemného lana (mm)
7 0.065   = odpor fazového vodica (ohm/km)
8 0.157   = odpor zemného lana (ohm/km)
9 0.3     = T/D ratio fazového vodica
10 0.7788  = parameter lana teta
11 100     = rezistivita pody (ohm.m)
12 1.0     = počet vodičov vo zväzku
13 0.0     = krok zväzku (m)
14 -2.7    = d1 - vzdialenosť prvého vodica od stožiara - 1. system (m)
15 -3.5    = d2 - vzdialenosť druhého vodica od stožiara - 1. system (m)
16 -2.7    = d3 - vzdialenosť tretieho vodica od stožiara - 1. system (m)
17 2.7     = d1x - vzdialenosť prvého vodica od stožiara - 2. system (m)
18 3.5     = d2x - vzdialenosť druhého vodica od stožiara - 2. system (m)
19 2.7     = d3x - vzdialenosť tretieho vodica od stožiara - 2. system (m)
20 0.0     = dz11 - vzdialenosť prvého zemného lana od stožiara (m)
21 0.0     = dz12 - vzdialenosť druhého zemného lana od stožiara (m)
22 21.49   = h1 (m)
23 17.69   = h2 (m)
24 13.89   = h3 (m)
25 21.49   = h1x (m)
26 17.69   = h2x (m)
27 13.89   = h3x (m)
28 27.60   = hz11 (m)
29 36.45   = hz12 (m)

```

Obr. 4.2: Príklad správne zadáných vstupných hodnôt do programu ELPAM MultiGeo

Vstupných súborov *data_geoX.txt* sa nachádza v priečinku dokopy 10. Každý jeden zodpovedá za jednu geometriu na trase vedenia. Ak teda počítame parametre pre linku, ktorá nemení počas svojej celej dĺžky ani jeden raz geometriu stožiara, stačí nám vyplniť len súbor *data_geo1.txt*. Pokiaľ sa zmení raz, dokopy budú geometrie na trase dve, vyplníme *data_geo1.txt* aj *data_geo2.txt*. Na konci výpočtu sa určia celkové elektrické parametre váženým priemerom vzhľadom na celú dĺžku vedenia a samotné dĺžky jednotlivých úsekov geometrií.

4.2.2 Zadávanie vstupných údajov v konzole

Pri samotnom spustení programu sa ELPAM MultiGeo vždy spýta, koľko rozličných úsekov budeme chcieť rátať. Menu je jednoducho zrozumiteľné a pohybujeme sa v ňom pomocou číslíc alebo y/n (áno/nie) s následným potvrdením klávesou Enter.

Dôležitou časťou je voľba druhu výpočtu. Na výber máme všetky bežne používané alternatívy vedení od jednoduchého trojfázového vedenia až po dvojsystémové vedenie s dvoma zemnými lanami. Ešte významnejšie je uvedenie si, že túto voľbu mám pre každú časť linky čo

sa týka geometrie. Je to priestor určený hlavne pre zmenu počtu zemných lán. Pomocou Kرونovej redukcie totiž zemné laná eliminujem a zahrňam do takzvaných modifikovaných matíc⁷. Dôsledok tejto možnosti prispôsobenia sa je ale nutnosť zadať vždy len počítanie pre všetky geometrie ako jeden systém alebo ako dvojsystém nezávisle na počte zemných lán. Všetky možnosti sú nasledovné:

- 0 - negácia výpočtu
- 1 - výpočet jeden systém bez zemných lán
- 2 - výpočet jeden systém s jedným zemným lanom
- 3 - výpočet jeden systém s dvoma zemnými lanami
- 4 - výpočet dvojsystém bez zemných lán
- 5 - výpočet dvojsystém s jedným zemným lanom
- 6 - výpočet dvojsystém s dvoma zemnými lanami

Po vypočítaní všetkých geometrií na trase dostávame ešte možnosť dopočítať výsledné parametre v reálnych hodnotách alebo v hodnotách na kilometer pre celú linku. Ak tak neurobíme, program sa ukončí.

```

elpam_multigeo_1
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
ELPAM MultiGeo version 1.1
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Pocet vstupnych geometrii?
1
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
geometria cislo      1
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

0 - negacia vypoctu
1 - vypocet 3 fv + 0 zl
2 - vypocet 3 fv + 1 zl
3 - vypocet 3 fv + 2 zl
4 - vypocet 6 fv + 0 zl
5 - vypocet 6 fv + 1 zl
6 - vypocet 6 fv + 2 zl
1

zvoleny vypocet 3 fv + 0 zl

[L] zapisana...
[P] zapisana...
[Z] zapisana...
[Zred] zapisana...
[Pred] zapisana...
[Lred] zapisana...
[C] zapisana...
Zvod [G] zanedbany ...
[Yred] zapisana...
[Z012] zapisana...
[Y012] zapisana...
[C012] zapisana...
[L012] zapisana...
    
```

Obr. 4.3: Znáznornenie voľby druhu výpočtu

```

elpam_multigeo_1
Prepocitat parametre na zvolenu dlzku na konci vsetkych geometrii? <y/n>
< !!! vsetky geometrie musia mat rovnaky pocet fazovych vodičov !!! >
y
[Z012_FIN] zapisana...
[Y012_FIN] zapisana...
[C012_FIN] zapisana...
[L012_FIN] zapisana...

[Z012_FIN/km] zapisana...
[Y012_FIN/km] zapisana...
[C012_FIN/km] zapisana...
[L012_FIN/km] zapisana...

1. system:
R0 = 0.21479 [Ohm/km]
R1 = 0.06935 [Ohm/km]
R2 = 0.06935 [Ohm/km]
X0 = 1.49738 [Ohm/km]
X1 = 0.38145 [Ohm/km]
X2 = 0.38145 [Ohm/km]
G = zanedbane
B0 = 1.49238 [mikroS/km]
B1 = 3.03312 [mikroS/km]
B2 = 3.03312 [mikroS/km]
C0 = 4.75040 [nF/km]
C1 = 9.65472 [nF/km]
C2 = 9.65472 [nF/km]
L0 = 4.76633 [mH/km]
L1 = 1.21421 [mH/km]
L2 = 1.21421 [mH/km]
alfa = 0.9738E-04
Beta = 0.1080E-02
Zv = 357.52577 [Ohm] -5.15218 [deg]
Sp = 40.75089 [MVA] -5.15218 [deg]

Press [Enter] to close the terminal ...
    
```

Obr. 4.4: Znáznornenie voľby konečných výsledkov a samotné výsledky

⁷výsledné štvorcové matice, ktoré obsahujú aj vlastnosti zemných lán systému.

4.2.3 Výstupné údaje z programu

Na Obr. 4.5 a 4.6 môžeme vidieť zhrnutie najdôležitejších vyrátaných parametrov po kladnom zvolení poslednej možnosti programu. Tieto výsledky sa zapisujú do súboru *output.txt* a zároveň aj vypisujú na samotnú konzolu pre okamžitú možnosť kontroly výsledkov. Okrem tejto finálnej podoby výsledkov nájdeme v súbore *output.txt* aj priebežne vypočítané matice pre všetky parametre. Uvádzam na príklade impedančnej matice v modifikovanom (nazývané aj redukovanom) tvare pre dvojsystém na Obr. 4.7. Môžeme teda povedať, že tento súbor výsledkov nám slúži aj ako archív a kontrola celkového výpočtu. V prípade pochybností možno chybu hľadať aj práve touto cestou.

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
zhrnutie dôležitých parametrov
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

1. system:

R0 = 0.13455 [ohm/km]
R1 = 0.03318 [ohm/km]
R2 = 0.03318 [ohm/km]
X0 = 0.83387 [ohm/km]
X1 = 0.29488 [ohm/km]
X2 = 0.29488 [ohm/km]
G_ = zanedbane
B0 = 2.21997 [mikros/km]
B1 = 3.96840 [mikros/km]
B2 = 3.96840 [mikros/km]
C0 = 7.06639 [nF/km]
C1 = 12.63182 [nF/km]
C2 = 12.63182 [nF/km]
L0 = 2.65429 [mH/km]
L1 = 0.93865 [mH/km]
L2 = 0.93865 [mH/km]
Alfa = 0.6077E-04
Beta = 0.1083E-02
Zv = 273.45417 [ohm] -3.21002 [deg]
Sp = 585.10718 [MVA] -3.21002 [deg]

```

Obr. 4.5: Zhrnutie skúmaných elektrických parametrov na konci vedenia v textovom súbore

```

1. system:

R0 = 0.21479 [Ohm/km]
R1 = 0.06935 [Ohm/km]
R2 = 0.06935 [Ohm/km]
X0 = 1.49738 [Ohm/km]
X1 = 0.38145 [Ohm/km]
X2 = 0.38145 [Ohm/km]
G_ = zanedbane
B0 = 1.49238 [mikros/km]
B1 = 3.03312 [mikros/km]
B2 = 3.03312 [mikros/km]
C0 = 4.75040 [nF/km]
C1 = 9.65472 [nF/km]
C2 = 9.65472 [nF/km]
L0 = 4.76633 [mH/km]
L1 = 1.21421 [mH/km]
L2 = 1.21421 [mH/km]
Alfa = 0.9738E-04
Beta = 0.1080E-02
Zv = 357.52577 [Ohm] -5.15218 [deg]
Sp = 40.95089 [MVA] -5.15218 [deg]

Press [Enter] to close the terminal ...

```

Obr. 4.6: Zhrnutie skúmaných elektrických parametrov na konci vedenia v konzole

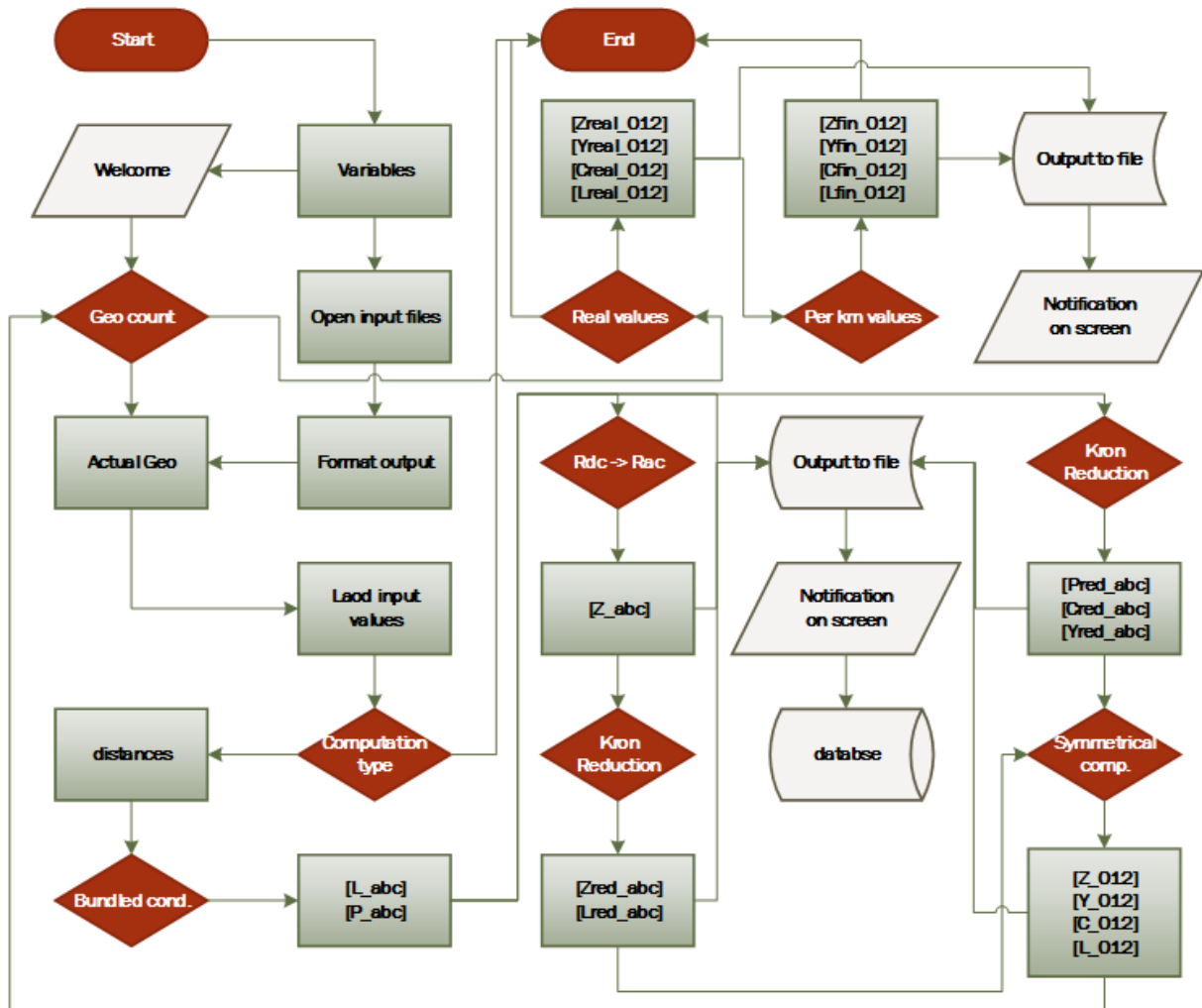
Impedančna matica (redukovaná zložková) [Z012_FIN/km] [ohm/km]:

	0	1	2	0	1	2
0	0.13455	0.00341	-0.00019	0.09942	0.00611	-0.00582
i	0.83387	-0.03138	-0.03120	0.40940	0.01351	0.01248
1	-0.00019	0.03318	-0.00352	0.01281	-0.00160	0.00221
i	-0.03120	0.29488	0.02233	-0.01815	0.00009	-0.00130
2	0.00341	0.00412	0.03318	-0.01110	-0.00218	0.00181
i	-0.03138	0.02221	0.29488	-0.01794	-0.00131	-0.00008
0	0.09942	-0.01110	0.01281	0.13455	0.02391	-0.02472
i	0.40940	-0.01794	-0.01815	0.83387	0.00878	0.00664
1	-0.00582	0.00181	0.00221	-0.02472	0.03318	-0.02131
i	0.01248	-0.00008	-0.00130	0.00664	0.29488	-0.00761
2	0.00611	-0.00218	-0.00160	0.02391	0.02115	0.03318
i	0.01351	-0.00131	0.00009	0.00878	-0.00817	0.29488

Obr. 4.7: Príklad zápisu vypočítanej impedančnej matice ako výsledok výpočtov z programu

4.3 Logika programu

Aj napriek relatívne malej veľkosti tohoto programu, je značne komplexný čo sa týka jeho vnútornej logiky. Na Obr. 4.8 je znázornený jeho zjednodušený vývojový diagram od spustenia aplikácie až po jej ukončenie.



Obr. 4.8: Zjednodušený diagram logiky programu ELPAM MultiGeo

Červené bunky so zaoblenými hranami predstavujú koncové body (začiatok a koniec) procesu. Červené kosoštvorce znázorňujú dôležité udalosti, procesy alebo voľbu užívateľom. Kosoštvorce bez výplne znázorňujú výpis údajov na konzole. Bunky v tvare ohnutej roviny znázorňujú zápis do súboru. Bunky v tvare ležatého valca znázorňujú uloženie získaných hodnôt do databázy pripravené na ďalšie použitie. Obdĺžniky predstavujú stav, alebo proces v programe. Smer šípky vychádzajúci z akejkoľvek bunky určuje smer toku informácií, procesov.

Celý proces sa začína spustením programu so správnymi vstupnými hodnotami. Definujú sa

premenné, otvoria všetky súbory, nastaví sa výstupný formát zobrazovania výsledkov. Následne je užívateľ vyzvaný k zadaniu počtu geometrií, ktoré si želá spočítať na linke. Nastaví sa slučka iterácií, ktorá počíta tento počet geometrií. Následne sa vyrátajú matice fázových hodnôt a neskôr aj matice v zložkových sústavách pre skúmané elektrické parametre. Detailný popis týchto úkonov možno nájsť v predchádzajúcich sekciách práce, kde sú podrobne rozobrané a vysvetlené (napríklad Kronova Redukcia, Transformácia do zložkových sústav a podobne). Výsledky z každej geometrie sú zaznamenané do samostatnej vrstvy v databázovej premennej. Databázová premenná je v jej podstate len veľká matica, ktorej posledný rozmer určuje o akú geometriu v poradí sa jedná. Ak je teda klasická matica rozmeru $N \times N$, databázová premenná bude mať rozmer $N \times N \times G$, kde N je počet fázových vodičov a G je počet rôznych geometrických štruktúr na trase zadaných užívateľom. Po ukončení slučky iterácií nastáva voľba užívateľa či si želá dorátať aj všeobecne parametre pre celú trasu, alebo mu stačia už zapísané výsledky v súbore. Po kladnej odpovedi sa postupne z databázovej premennej vyberajú vrstvy výsledkov a pre násobujú dĺžkou daného úseku (danej vrstvy). Každá ďalšia sa sčíta s predchádzajúcou až na koniec vedenia, kde sa nám zapíšu konkrétne hodnoty elektrických parametrov pre celé vedenie. Následne predelíme takto získané hodnoty celkovou dĺžkou vedenia v kilometroch, kde získame najčastejšie používanú formu výsledkov, a to vo forme jednotiek vzťahnutých na jeden kilometer linky. Týmto postupom sme dosiahli aj akýsi konečný vážený priemer elektrických parametrov pri viacerých geometriách na jedinej trase. Po tomto program už len vypíše získané hodnoty pre každý systém a ukončí sa. Opätovné spustenie je možné zas až cez samotnú .exe aplikáciu.

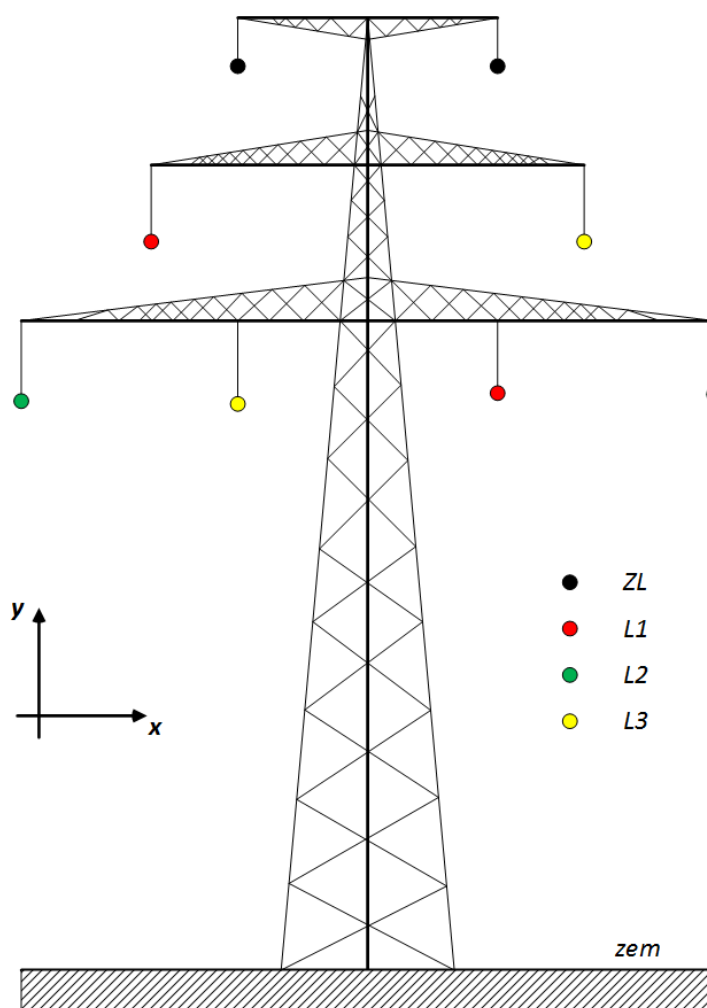
Tu je zoznam a vysvetlenia jednotlivých buniek v diagrame:

Start	- spustenie .exe súboru
Variables	- definovanie premenných
Welcome	- zobrazenie úvodnej obrazovky na konzole
Open Input Files	- otvorenie vstupných súborov (zároveň vytvorenie výstupného)
Format Output	- definovanie formátu výstupu výsledkov z programu
Geo Count	- užívateľ zadá počet želaných geometrií do výpočtu
Actual Geo	- zistenie aktuálnej geometrie na ktorej budú prebiehať výpočty
Load Input Values	- načítanie konkrétnych vstupných hodnôt zo súboru
Computation Type	- zvolený druh výpočtu užívateľom

Distances	- vypočítanie potrebných vzdialeností v danej geometrii stožiaru
Bundled Cond.	- ak sa jedná o zväzkový vodič, aplikujú sa príslušné úpravy
[L_{abc}]	- výpočet fázovej matice indukcie
[P_{abc}]	- výpočet fázovej matice potenciálových koeficientov
Rac -> Rdc	- kompenzácia jednosmerného odporu vodičov
Kron reduction	- vykonanie Kronovej redukcie na matici / maticiach
Output to File	- zápis výsledku / matice do súboru
Notification on Screen	- hláška na konzole hovoriaca o zápise výsledku do súboru
Database	- uloženie výsledky do vrstvy databázovej premennej
[Z_{abc}]	- výpočet fázovej matice impedancie
[L_{red_abc}]	- výpočet fázovej redukovanej matice indukcie
[Z_{red_abc}]	- výpočet fázovej redukovanej matice impedancie
[P_{red_abc}]	- výpočet fázovej redukovanej matice potenciálových koeficientov
[C_{red_abc}]	- výpočet fázovej redukovanej matice kapacitných koeficientov
[Y_{red_abc}]	- výpočet fázovej redukovanej matice admitancie
Symmetrical Comp.	- transformácie matice / matíc do zložkových sústav
[L_{012}]	- výpočet zložkovej matice indukcie
[C_{012}]	- výpočet zložkovej matice kapacitných koeficientov
[Z_{012}]	- výpočet zložkovej matice impedancie
[Y_{012}]	- výpočet zložkovej matice admitancie
Real Values	- voľba užívateľa v pokračovaní výpočtov reálnych hodnôt parametrov
[L_{real_012}]	- výpočet zložkovej matice indukcie v reálnych hodnotách
[C_{real_012}]	- výpočet zložkovej matice kapacitných koeficientov v reálnych hodn.
[Z_{real_012}]	- výpočet zložkovej matice impedancie v reálnych hodnotách
[Y_{real_012}]	- výpočet zložkovej matice admitancie v reálnych hodnotách
Per km Values	- rozdelenie matíc reálnych hodnôt celkovou dĺžkou vedenia
[L_{fin_012}]	- výpočet zložkovej matice indukcie na 1 km vedenia
[C_{fin_012}]	- výpočet zložkovej matice kapacitných koeficientov na 1 km vedenia
[Z_{fin_012}]	- výpočet zložkovej matice impedancie na 1 km vedenia
[Y_{fin_012}]	- výpočet zložkovej matice admitancie na 1 km vedenia
End	- uzatvorenie všetkých súborov, ukončenie programu

4.4 Verifikácia výsledkov

Verifikácia elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení je náročná úloha, nakoľko pri hoci aj najlepšom teoretickom modeli nevieme zahrnúť do výpočtov všetky aspekty ktoré sa vyskytujú, či v budúcnosti môžu vyskytnúť na trase danej linky. Rozhodol som sa teda vychádzať z hodnôt, ktoré už boli vypočítané certifikovanými laboratóriami. Jedným z takýchto ústavov je aj slovenské VÚJE, kde som mal možnosť mať k dispozícii výpočet elektrických parametrov vedenia 2x400 kV typu Donau. Na Obr. 4.9 je principiálne znázornený takýto stožiar aj s usporiadaním fáz a vyznačením súradnicovej sústavy. Tá je však tiež len orientačná, nakoľko najjednoduchšie je posadiť nulový bod oboch osí, ich priesečník, do bodu kde stred stožiaru prechádza do zeme. Na jednej strane stožiaru budeme systém zadávať so zápornými x-ovými súradnicami, zatiaľ čo druhý s kladnými.



Obr. 4.9: Stožiar typu Donau 2x400 kV, ilustračný príklad

4.4.1 Verifikácia pomocou zložkového tvaru elektrických parametrov

V tabuľke 4.1 som porovnal vypočítané elektrické parametre pomocou programu ELPAM MultiGeo s výsledkami od firmy **VÚJE, a. s.** (ďalej len VÚJE) a výpočtom pomocou časti programu Matlab Simulink - *Compute RLC Line Parameters* v bloku *PowerGUI* prevedením fázových matic do zložkového tvaru. Za referenčné hodnoty budem považovať výsledky od VÚJE, a.s. nakoľko sa jedná o reálnu štúdiu prenosovej linky.

Parameter	Metóda výpočtu	Výsledok	Δ [%]
R_0 [Ω/km]	VÚJE	0,11812	-
	Matlab	0,11811	0,01
	ELPAM	0,12461	5,49
$R_{1,2}$ [Ω/km]	VÚJE	0,02177	-
	Matlab	0,02219	1,94
	ELPAM	0,02349	7,90
X_0 [Ω/km]	VÚJE	0,76849	-
	Matlab	0,77016	0,22
	ELPAM	0,79317	3,21
$X_{1,2}$ [Ω/km]	VÚJE	0,27071	-
	Matlab	0,25814	4,64
	ELPAM	0,27198	0,47
B_0 [$\mu S/km$]	VÚJE	2,37902	-
	Matlab	2,48914	4,63
	ELPAM	2,31511	2,69
$B_{1,2}$ [$\mu S/km$]	VÚJE	4,16254	-
	Matlab	4,45760	7,09
	ELPAM	4,21241	1,20

Tabuľka 4.1: Verifikácia programu počítajúceho elektrické parametre pomocou ich zložkového tvaru - percentuálne porovnanie nepresnosti s programom od VÚJE a pomocou Matlabu

Ukazujú sa tu odchýlky pri oboch metódach - Matlabu, aj vytvoreného programu ELPAM MultiGeo. Celková priemerná odchýlka výpočtov pomocou Matlabu bola 3,09 % zatiaľ čo program pracujúci na princípe CDER sa dostal na hranicu 3,49 %. Považujem to teda za overe-

nie správnosti výsledkov pomocou tohoto programu.

Na Obr. 4.10 je vyobrazené prostredie určené na definovanie presnej geometrie stožiara, linky, vonkajšieho elektrického vedenia s následnou možnosťou výpočtu jeho elektrických parametrov v programe Matlab Simulink. Po stlačení "Compute RLC line parameters" dostaneme výsledok vo forme fázových matíc a aj v zložkovej sústave. Vyhodnoteniu pomocou fázových matíc sa venuje nasledujúca kapitola.

Units: metric

Frequency (Hz): 50

Ground resistivity (ohm.m): 100

Comments:
dvojsystem s 2 zemnymi lanami z
vypočtov parametrov od VUJE

Line Geometry

Number of phase conductors (bundles): 6

Number of ground wires (bundles): 2

Conductor (bundle)	Phase number	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Conductor (bundle) type
p 1	1	-9.6	29.16	22.56	1
p 2	2	-13.6	17.95	11.35	1
p 3	3	-7.3	17.95	11.35	1
p 4	4	7.3	17.95	11.35	1
p 5	5	13.6	17.95	11.35	1

Conductor and Bundle Characteristics

Number of conductor types or bundle types: 2

Conductor internal inductance evaluated from: Geometric Mean Radius (GMR)

☒ Include conductor skin effect

Conductor (bundle) type	Conductor outside diameter (cm)	Conductor T/D ratio	Conductor GMR (cm)	Conductor DC resistance (Ohm/km)	Conductor relative permeability	Number of conductors per bundle	Bundle diameter (cm)	Angle of conductor 1 (degrees)
1	2.963	0.3	1.15379	0.065	1	3	64.6582	30
2	2.12	0.3	0.82553	0.157	1	1	0	0

Buttons: Load typical data, Load user data, Save, Compute RLC line parameters, Help, Close

Obr. 4.10: Príklad zadávania vstupných hodnôt do Matlabu pre potreby výpočtov elektrických parametrov na vonkajších elektrických vedeniach

4.4.2 Verifikácia pomocou fázových matíc elektrických parametrov

Nakoľko všetky spôsoby výpočtu spomenuté v predchádzajúcej kapitole obsahovali aj fázové matice hľadaných elektrických parametrov, vytvoril som porovnanie aj na základe tohoto kritéria. Uvediem vždy najprv matice, zapísané pre jednoduchosť ako tabuľky, daného parametra. Následné budú porovnané vzhľadom k referenčným hodnotám - hodnotám od VÚJE - a percentuálna odchýlka bude zapísaná do príslušného miesta v matici. Pod ňou sa nachádza zhrnutie odchýlok, od referenčných hodnôt. Zároveň som hodnotil aj presnosť len samotných diagonálnych prvkov matíc - inak nazývané aj vlastné hodnoty (rezistancie, indukcie,...).

VÚJE - $R [\Omega/km]$					
5,5711E-2	3,2430E-2	3,2334E-2	3,1959E-2	3,1688E-2	3,2479E-2
3,2430E-2	5,2955E-2	3,1589E-2	3,1438E-2	3,1299E-2	3,1688E-2
3,2334E-2	3,1589E-2	5,3000E-2	3,1533E-2	3,1482E-2	3,1959E-2
3,1959E-2	3,1482E-2	3,1533E-2	5,3000E-2	3,1589E-2	3,2334E-2
3,1688E-2	3,1299E-2	3,1438E-2	3,1589E-2	5,2955E-2	3,2430E-2
3,2479E-2	3,1688E-2	3,1959E-2	3,2430E-2	3,2430E-2	5,5711E-2

Tabuľka 4.2: Fázová matica rezistancie vypočítaná VÚJE

Matlab Simulink - $R [\Omega/km]$					
5,5623E-2	3,2198E-2	3,2188E-2	3,1593E-2	3,1236E-2	3,1980E-2
3,2197E-2	5,3419E-2	3,1530E-2	3,1186E-2	3,0979E-2	3,1236E-2
3,2188E-2	3,1530E-2	5,3455E-2	3,1370E-2	3,1186E-2	3,1593E-2
3,1593E-2	3,1186E-2	3,1370E-2	5,3455E-2	3,1530E-2	3,2188E-2
3,1236E-2	3,0979E-2	3,1186E-2	3,1530E-2	5,3419E-2	3,2197E-2
3,1980E-2	3,1236E-2	3,1593E-2	3,2188E-2	3,2197E-2	5,5623E-2

Tabuľka 4.3: Fázová matica rezistancie vypočítaná cez Matlab

Vo výsledku vidíme, že pomocou Matlabu dostaneme výsledky vždy minimálne o dve percentá bližšie k referencii čo sa týka všetkých prvkov. Pri matici kapacitných koeficientov však nastala situácia, kedy sa odchýlka diagonály vytvoreného programu od referenčných hodnôt zmenšila natoľko, že napriek celkovej vyššej chybe, bola takmer dva krát menšia vzhľadom na

ELPAM MultiGeo - $R [\Omega/km]$					
5,9709E-2	3,4180E-2	3,4150E-2	3,3320E-2	3,2870E-2	3,3930E-2
3,4180E-2	5,5899E-2	3,2800E-2	3,2390E-2	3,2129E-2	3,2870E-2
3,4150E-2	3,2800E-2	5,5980E-2	3,2610E-2	3,2390E-2	3,3320E-2
3,3320E-2	3,2390E-2	3,2610E-2	5,5980E-2	3,2800E-2	3,4150E-2
3,2870E-2	3,2129E-2	3,2390E-2	3,2800E-2	5,5899E-2	3,4180E-2
3,3930E-2	3,2870E-2	3,3320E-2	3,4150E-2	3,4180E-2	5,9709E-2

Tabuľka 4.4: Fázová matica rezistancie vypočítaná programom ELPAM MultiGeo

$\Delta R [\%]$											
Matlab Simulink						ELPAM MultiGeo					
0,158	0,717	0,451	1,147	1,429	1,538	7,177	5,393	5,616	4,256	3,727	4,464
0,717	0,875	0,186	0,799	1,023	1,429	5,393	5,560	3,833	3,027	2,654	3,727
0,451	0,186	0,856	0,518	0,938	1,147	5,616	3,833	5,620	3,413	2,882	4,256
1,147	0,938	0,518	0,856	0,186	0,451	4,256	2,882	3,413	5,620	3,833	5,616
1,429	1,023	0,799	0,186	0,875	0,717	3,727	2,654	3,027	3,833	5,560	5,393
1,538	1,429	1,147	0,748	0,717	0,158	4,464	3,727	4,256	5,301	5,393	7,177
Celková priemerná chyba:				0,817 %		Celková priemerná chyba:				4,461 %	
Priemerná chyba diagonály:				0,630 %		Priemerná chyba diagonály:				6,119 %	

Tabuľka 4.5: Matica absolútnych chýb rezistancie Matlabu a ELPAM MultiGeo a ich celkové vyhodnotenie vzhľadom na výpočty od VÚJE, a.s.

Matlab. Rovnako, keď sa spätne pozrieme na vyhodnotenie cez zložkový tvar parametrov, do Tab. 4.1, vidíme rozdiel výpočtov cez Matlab hlavne pri susceptancii, ktorá však úzko súvisí s kapacitnými koeficientami vedenia. Rovnako sa nám potvrdil predpoklad pri vyhodnotení rezistancie, kde program počítajúci pomocou metódy CDER mal odchýlky znateľne vyššie ako Matlab. Vidíme teda, že každá metóda má svoje svetlé miesta a aj svoje úskalia. Tieto závery však vychádzajú len z referenčných hodnôt už realizovaných výpočtov. Vážnou otázkou však je, ktorá metóda je reálnemu stavu na vedeniach najbližšia. Pre ilustráciu tohoto problému som uviedol aj porovnanie výsledkov vytvoreného programu s hodnotami vypočítanými pomocou Matlab Simulinku v Tab. 4.14. Z nich možno pozorovať že ich vzájomné odchýlky sú v zásade menšie, ako tomu bolo v predchádzajúcom prípade. Táto problematika si vyžaduje hlbšie po-

VÚJE - L [mH/km]					
1,3104	0,4677	0,4704	0,3634	0,3250	0,3276
0,4677	1,4350	0,6463	0,4102	0,3649	0,3250
0,4704	0,6463	1,4241	0,4748	0,4102	0,3634
0,3634	0,4102	0,4748	1,4241	0,6463	0,4704
0,3250	0,3649	0,4102	0,6463	1,4350	0,4677
0,3276	0,3250	0,3634	0,4704	0,4677	1,3104

Tabuľka 4.6: Fázová matica indukcie vypočítaná VÚJE

Matlab Simulink - L [mH/km]					
1,2941	0,4845	0,4873	0,3787	0,3395	0,3461
0,4845	1,4056	0,6579	0,4212	0,3754	0,3395
0,4873	0,6579	1,3952	0,4862	0,4212	0,3787
0,3787	0,4212	0,4862	1,3952	0,6579	0,4873
0,3395	0,3754	0,4212	0,6579	1,4056	0,4845
0,3461	0,3395	0,3787	0,4873	0,4845	1,2941

Tabuľka 4.7: Fázová matica indukcie vypočítaná cez Matlab

znatky z danej oblasti a verifikácie samotnými meraniami. Je to téma nesmierne zaujímavá, a verím že sa bude nielen u nás v najbližších rokoch aktívne rozvíjať.

ELPAM MultiGeo - L [mH/km]					
1,3258	0,4897	0,4920	0,3868	0,3498	0,3448
0,4897	1,4710	0,6773	0,4420	0,3978	0,3498
0,4920	0,6773	1,4586	0,5056	0,4420	0,3868
0,3868	0,4420	0,5056	1,4586	0,6773	0,4920
0,3498	0,3978	0,4420	0,6773	1,4710	0,4897
0,3448	0,3498	0,3868	0,4920	0,4897	1,3258

Tabuľka 4.8: Fázová matica indukcie vypočítaná programom ELPAM MultiGeo

ΔL [%]											
Matlab Simulink						ELPAM MultiGeo					
1,245	3,598	3,594	4,215	4,448	5,653	1,171	4,695	4,583	6,420	7,596	5,242
3,598	2,055	1,793	2,691	2,884	4,448	4,695	2,498	4,797	7,750	9,000	7,596
3,594	1,793	2,029	2,404	2,691	4,215	4,583	4,797	2,423	6,488	7,750	6,420
4,215	2,691	2,404	2,029	1,793	3,594	6,420	7,750	6,488	2,423	4,797	4,583
4,448	2,884	2,691	1,793	2,055	3,598	7,596	9,000	7,750	4,797	2,498	4,695
5,653	4,448	4,215	3,594	3,598	1,245	5,242	7,596	6,420	4,583	4,695	1,171
Celková priemerná chyba:				3,164 %		Celková priemerná chyba:				5,374 %	
Priemerná chyba diagonály:				1,776 %		Priemerná chyba diagonály:				2,058 %	

Tabuľka 4.9: Matica absolútnych chýb indukcie Matlabu a ELPAM MultiGeo a ich celkové vyhodnotenie vzhľadom na výpočty od VÚJE, a.s.

VÚJE - C [nF/km]					
10,3403	-1,5422	-1,5397	-0,6123	-0,3381	-1,1926
-1,5422	11,7931	-2,5951	-0,2891	-0,1241	-0,3381
-1,5397	-2,5951	11,9386	-0,8317	-0,2891	-0,6123
-0,6123	-0,2891	-0,8317	11,9386	-2,5951	-1,5397
-0,3381	-0,1241	-0,2891	-2,5951	11,7931	-1,5422
-1,1926	-0,3381	-0,6123	-1,5397	-1,5422	10,3403

Tabuľka 4.10: Fázová matica kapacitancie vypočítaná VÚJE

Matlab Simulink - C [nF/km]					
11,3970	-1,6198	-1,6243	-0,6041	-0,2981	-1,0011
-1,6198	12,3550	-3,0211	-0,3348	-0,1308	-0,2981
-1,6243	-3,0211	12,5480	-0,9958	-0,3348	-0,6041
-0,6041	-0,3348	-0,9958	12,5480	-3,0211	-1,6243
-0,2981	-0,1308	-0,3348	-3,0211	12,3550	-1,6198
-1,0011	-0,2981	-0,6041	-1,6243	-1,6198	11,3970

Tabuľka 4.11: Fázová matica kapacitancie vypočítaná cez Matlab

ELPAM MultiGeo - C [nF/km]					
10,9853	-1,5517	-1,5472	-0,6027	-0,3174	-0,9213
-1,5517	11,4909	-2,9402	-0,4031	-0,1761	-0,3174
-1,5472	-2,9402	11,7099	-1,0501	-0,4031	-0,6027
-0,6027	-0,4031	-1,0501	11,7099	-2,9402	-1,5472
-0,3174	-0,1761	-0,4031	-2,9402	11,4909	-1,5517
-0,9213	-0,3174	-0,6027	-1,5472	-1,5517	10,9853

Tabuľka 4.12: Fázová matica konduktancie vypočítaná programom ELPAM MultiGeo

ΔC [%]											
Matlab Simulink						ELPAM MultiGeo					
10,21	5,034	5,492	1,342	11,82	16,05	6,237	0,616	0,490	1,561	6,139	22,75
5,034	4,763	16,41	15,78	5,330	11,82	0,616	2,562	13,29	39,42	41,82	6,139
5,492	16,41	5,103	19,72	15,78	1,342	0,490	13,29	1,915	26,25	39,42	1,561
1,342	15,78	19,72	5,103	16,41	5,492	1,561	39,42	26,25	1,915	13,29	0,490
11,82	5,330	15,78	16,41	4,763	5,034	6,139	41,82	39,42	13,29	2,562	0,616
16,05	11,82	1,342	5,492	5,034	10,21	22,75	6,139	1,561	0,490	0,616	6,237
Celková priemerná chyba:				9,610 %		Celková priemerná chyba:				12,478 %	
Priemerná chyba diagonály:				6,695 %		Priemerná chyba diagonály:				3,572 %	

Tabuľka 4.13: Matica absolútnych chýb kapacitancie Matlabu a ELPAM MultiGeo a ich celkové vyhodnotenie vzhľadom na výpočty od VÚJE, a.s.

Matlab referenčné hodnoty					
ΔR [%]					
7,348	6,156	6,095	5,466	5,231	6,098
6,156	4,644	4,028	3,857	3,715	5,231
6,095	4,028	4,724	3,953	3,857	5,466
5,466	3,857	3,953	4,724	4,028	6,095
5,231	3,715	3,857	4,028	4,644	6,156
6,098	5,231	5,466	6,095	6,156	7,348
Celková priemerná chyba:				5,119 %	
Priemerná chyba diagonály:				5,572 %	
ΔL [%]					
2,447	1,059	0,954	2,115	3,013	0,390
1,059	4,649	2,950	4,926	5,944	3,013
0,954	2,950	4,545	3,988	4,926	2,115
2,115	4,926	3,988	4,545	2,950	0,954
3,013	5,944	4,926	2,950	4,649	1,059
0,390	3,013	2,115	0,954	1,059	2,447
Celková priemerná chyba:				2,889 %	
Priemerná chyba diagonály:				3,880 %	
ΔC [%]					
3,612	4,206	4,741	0,222	6,446	7,971
4,206	6,994	2,680	20,418	34,648	6,446
4,741	2,680	6,679	5,455	20,418	0,222
0,222	20,418	5,455	6,679	2,680	4,741
6,446	34,648	20,418	2,680	6,994	4,206
7,971	6,446	0,222	4,741	4,206	3,612
Celková priemerná chyba:				7,932 %	
Priemerná chyba diagonály:				5,761 %	

Tabuľka 4.14: Matica absolútnych chýb parametrov y programu ELPAM MultiGeo a ich celkové vyhodnotenie vzhľadom na výpočty Matlab Simulinku

Záver

V tejto diplomovej práci som sa zaoberal problematikou výpočtu elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení. Na začiatku som uviedol historický prehľad a chronológiu, 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 veľmi reálnymi výsledkami, a preto sa dodnes používa v množstve výpočtových programov (spomeňme napríklad americké EMTP). Nástupcom tejto metódy by mohla byť mladšia CDER metóda, ktorá vykazuje veľmi presné výsledky aj za použitia jednoduchších matematických operácií. V ďalšom pokračovaní práce som sa teda zamerlal hlavne na túto metódu a jej verifikáciu.

Zhrnul som všetky momentálne používané spôsoby výpočtu impedancie a admitancie vedení, ktoré môžu do budúcnosti slúžiť napríklad pre účely ďalšieho štúdia alebo už len ako samotná ilustrácia rôznych prístupov k problému. Toto zhrnutie obsahuje aj transformácie do zložkových sústav a zahrnutie zväzkového vidča či zemných lán do výpočtov. Ku všetkým vedeniam som pristupoval v prvom rade ako k netransponovaným, inak povedané, výsledky sú interpretované hlavne vo forme matíc parametrov vedenia.

Venoval som sa kritériám ktoré určujú symetrizáciu vedenia. Všeobecne sa líšia krajina od krajiny, no nás sa najviac dotýka interná norma ČEPS TN 62/10/2012, ktorá jasne stanovuje tieto podmienky. Jedná sa o pomer hodnôt nulovej a súslednej zložky prúdu pri ustálenom stave na danom vedení. Až po prekročení tohoto limitu je potrebné uvažovať o symetrizácii (transpozícii), či inej kompenzácii na danej linke. Navrhol som kompletný matematický aparát výpočtu takejto nesymetrie na vedení, kde sa ukáže len nesymetria jedného vedenia. V realite je však tento proces náročnejší o fakt, že sústava je silno prepojená a už samotné vstupné hodnoty do akéhokoľvek vedenia, vystriedaného či nie, sú nesúmerné. Túto myšlienku som podporil citovanými výsledkami štúdie od EGU Laboratories, Praha. Tie jasne ukazujú na dokonca väčšiu

vstupnú nesymetriu, než jej prírastok na vedení. Je teda naozaj kľúčové poznať pomery v sieti pred takouto analýzou.

V časti venujúcej sa návrhu výpočtu prúdovej nesymetrie na vedení som zároveň zhrnul a z časti porovnal presnosť jednotlivých náhradných modelov vedenia. Vytvorením imaginárneho Π -článku z modelu s rozloženými parametrami som dokázal, že pri malých vzdialenostiach sú ich hodnoty naozaj veľmi blízke. Pri väčších vzdialenostiach sa však nepresnosť zvyšuje. Najvyššia sledovaná chyba bola zaznamenaná pri pomyselnej dĺžke vedenia 500 km v reálnej zložke impedancie - 7,14 %.

Posledná kapitola zahŕňa detailný popis, vypracovanie a z časti aj návod na používanie programu, ktorý som vytvoril na výpočet elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení. Použil som v ňom do budúcnosti perspektívnu metódu CDER a programovací jazyk Fortran90 v vývojovom prostredí NetBeans IDE. Tento program je schopný vypočítať impedanciu, admittanciu, konštantu šírenia vln, charakteristickú impedanciu a prirodzený výkon vedenia. Nazval som ho ELPAM MultiGeo, vďaka jeho schopnosti počítať tieto parametre aj na linke, ktorá počas svojej trasy mení geometriu stožiaru. Považujem túto funkcionálnosť za veľmi užitočnú, nakoľko dnes už ťažko nájdeme inak vystavané vedenie. Výstupom z neho sú fázové matice požadovaných parametrov, či ich prevedené hodnoty do zložkových sústav.

Aby som dokázal, že program ELPAM MultiGeo dosahuje naozaj požadované výsledky, bolo potrebné ho dostatočne verifikovať. Bol teda otestovaný na dvojsystéme s dvoma zemnými lanami na stožiaru typu Donau 400 kV. Pre tento konkrétny typ som mal k dispozícii vypočítané hodnoty od spoločnosti VÚJE, a.s. a rovnako som využil prístup k Matlab Simulink-u, kde som využil blok PowerGUI a jeho funkciu "Compute RLC Line Parameters". Prvé porovnanie spočívalo v zložkových hodnotách elektrických parametrov. Celková priemerná odchýlka môjho programu od referenčných hodnôt VÚJE bola 3,49 %, zatiaľ čo priemerná odchýlka Matlabu od referenčných hodnôt bola 3,09%. V druhom teste som porovnával fázové matice parametrov a samostatne ich vlastné hodnoty (hodnoty na diagonále). Pri uvažovaní referenčných hodnôt od VÚJE bola najväčšia odchýlka zaznamenaná pri matici kapacitných koeficientov (12,5%), nie však na jej diagonále (3,5%). Matlab v tomto prípade taktiež vykazoval najväčšiu nepresnosť pri tejto matici (9,6%). Ak som uvažoval referenčné hodnoty od Matlab-u, najvyššia odchýlka

programu bola len 7,9%. Týmto považujem program za dostatočne verifikovaný, nakoľko ani samotné na prvý pohľad presné spôsoby výpočtu neboli zhodné a líšili sa od seba v podobnom meradle ako môj vytvorený program od nich.

Problematika výpočtov elektrických parametrov vonkajších elektrických vedení je dnes síce už spracovaná na dobrej úrovni vo svete, no napriek tomu je náročné určiť, ktorá metóda je naozaj tá najbližšia realite. Stále je veľmi veľa podmienok, ktoré vplývajú na tieto parametre a je otázkou na nás, ako budeme vedieť tieto prekážky prekonávať. Neustálym experimentovaním a skúšaním nových prístupov však vieme určite s časom vytvoriť niečo omnoho univerzálnejšie ako to, čo sa momentálne využíva v energetike dnes. Spájaním poznatkov a odborníkov z viacerých oblastí (informačné technológie, teória elektromagnetických polí, geodézia, ...) získame nielen kvalitnejšie výstupy našej práce, ale aj kooperatívneho ducha, ktorý nás môže hnať stále vpred, inovovať zastarané postupy, či nepriamo znižovať náklady pri výstavbe a prevádzke vedení. Stále je čo skúmať, a všetko sa dá urobiť lepšie. Verím, že táto práca prispeje práve k takémuto pohľadu na výpočty elektrických parametrov v energetike.

Literatúra

- [1] J. R. Carson, “Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return,” *Bell System Technical Journal*, vol. 5, pp. 539–554, 1926. [Online]. Available: <http://archive.org/details/bstj5-4-539>
- [2] H. W. Dommel, “Electromagnetic transients program theory book,” 1986. [Online]. Available: http://www.dee.ufrj.br/Transm_Energia/Arquivos/EMTPTB.PDF
- [3] W. Kersting and R. Green, “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.
- [4] C. Gary, “Complete Approach to Multiconductor Propagation at High Frequencies with Complex Matrices, in French,” *EDF Bulletin de la Direction des Études et Reserches*, pp. 5–20, 1976.
- [5] C. Dubanton, “Approximate Calculation of Primary and Secondary Transmission Line Parameters, Zero Sequence Values, in French,” *EDF Bulletin de la Direction des Études et Reserches*, pp. 53–62, 1969.
- [6] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, and A. Castanheira, “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.
- [7] H. Umarji, “Calculation of Parameters of Overhead Power Lines.” [Online]. Available: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137455925/Resumo_ingles.pdf
- [8] M. Vintan, P. I. Mihiu, and I. Borlea, “AC Power Lines Impedances Computational Methods.” [Online]. Available: http://www.energy-cie.ro/archives/2011/3.16-2_vintan_m_corectat.pdf

- [9] Š. Fecko, D. Reváková, L. Varga, J. Lago, and S. Ilenin, “Vonkajšie Elektrické Vedenia,” 2010.
- [10] UTS, “Power Circuit Theory Notes - Lecture 5,” 2011. [Online]. Available: <http://www.uts.edu.au/>
- [11] W. Lewis and P. D. Tuttle, “Resistance and Reactance of Aluminium Conductors Steel Reinforced,” 1959.
- [12] R. a. Rivas, “Overhead Transmission Lines and Underground Cables,” in *Handbook of Electric Power Calculations*, 2001.
- [13] S. E. Zocholl, “Introduction to Symmetrical Components.” [Online]. Available: http://www.pacw.org/fileadmin/doc/Sequence_Components_Untransposed_Lines.pdf
- [14] Z. Liu, “Probabilistic Assessment of Unbalance in Distribution Networks Based on Limited Monitoring Miss Zhixuan Liu,” Ph.D. dissertation, The University of Manchester, 2014.
- [15] E. T. B. Gross and W. Chin, “Electrostatic Unbalance of Untransposed Single Circuit Lines,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-87, no. 1, pp. 24–34, 1968.
- [16] “V404 - modernizace na vyšší parametry studie posouzení hygienických limitů dle nv č.1/2008 sb. hluková studie – výpočet nesymetrie,” jun 2013.
- [17] G. Glanzmann, “Facts flexible alternating current transmission systems,” jan 2005.
- [18] “Chapter 2 - transmission line models,” 2013, lecture Notes on Electrical Power Systems. [Online]. Available: <http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/machine/ui/chap2.pdf>
- [19] Bhatti, A. A., “A Computer Based Method for Computing the N-Dimensional Generalized ABCD Parameter Matrices of N-Dimensional Systems with Distributed Parameters,” no. 3, pp. 590–593, 1990.
- [20] J. C. Adams, W. S. Brainerd, J. T. Martin, B. T. Smith, and J. L. Wagener, “Fortran 90 Handbook,” 1992.

-
- [21] M. M. Adibi, D. P. Milanicz, and T. L. Volkmann, "Asymmetry issues in power system restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1085–1091, 1999.
 - [22] A. Arnold, "The alternating-current resistance of tubular conductors," *Electrical Engineers, Journal of the Institution of*, no. 6, pp. 580–593, 1936. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5317095
 - [23] M. Benzi, "Lecture I : Review of Matrix Theory and Matrix Functions," pp. 15–20, 2014.
 - [24] A. A. Bhatti, "Transient and steady state solution of N-dimensional coupled networks and development of equivalent Pi and T matrix networks with distributed parameters," *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, no. May, pp. 1195–1199, 2013.
 - [25] W. I. Bowman and J. M. McNamee, "Development of Equivalent Pi and T Matrix Circuits for Long Untransposed Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, 1964.
 - [26] D. Coleman, F. Watts, and R. B. Shipley, "Digital Calculation of Overhead- Transmission-Line Constants," no. February, pp. 1266–1268, 1959.
 - [27] R. Davies, A. Rea, and D. Tsaptisinos, "Introduction to Fortran 90. An introduction Course for Novice Programmers," p. 102, 2011.
 - [28] A. M. Gashimov, A. R. Babayeva, and A. Nayir, "Transmission line transposition," *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009*, no. 994 12, pp. 364–367, 2009.
 - [29] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, "Power System Analysis and Design," 2012.
 - [30] E. T. B. Gross and A. W. Weston, "Transposition of High-Voltage Overhead Lines and Elimination of Electrostatic Unbalance to Ground," vol. 70, pp. 1837–1844, 1951.
 - [31] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Admittance-based modeling of transmission lines by a folded line equivalent," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 231–239, 2009.

- [32] M. H. Hesse, "Circulating Currents in Paralleled Untransposed Multicircuit Lines: II - Methods for Estimating Current Unbalance," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-85, no. 7, pp. 812–820, 1966.
- [33] N. Higham, "Theory of Matrix Functions," *Functions of matrices: theory and computation*, 2008.
- [34] J. Horak, "Zero Sequence Impedance of Overhead Transmission Lines," in *59th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2006, pp. 182–192.
- [35] A. Kalyuzhny and G. Kushnir, "Analysis of current unbalance in transmission systems with short lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 1040–1048, 2007.
- [36] W. H. Kersting, "Distribution System Modeling and Analysis," 2008. [Online]. Available: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- [37] F. Kiessling, P. Nefzger, J. Nolasco, and U. Kaintzyk, *Overhead Power Lines - Planning, Design, Construction*, 2002.
- [38] P. Kini, R. Bansal, and R. Aithal, "A Novel Approach Toward Interpretation and Application of Voltage Unbalance Factor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 2315–2322, 2007.
- [39] J. Kunt, "Technical Infrastructure Concept of the Power Grid, in Czech," 2012.
- [40] National Programme on Technology Enhanced Learning, "Transmission Line Models," *Ministry of HRD Government of India*, vol. 0, 2013. [Online]. Available: <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/machine/ui/chap2.pdf>
- [41] S. W. Nelson, "Electromagnetic Unbalance or Untransposed Transmission Lines Arrangement," 1955.
- [42] H. Partl, I. Hyna, and E. Schlegl, "The Not So Short Introduction to $L\epsilon T E X 2$," 2011.
- [43] O. Ramos-lea nos, J. L. Naredo, and J. A. Gutierrez-robles, "An Advanced Transmission Line and Cable Model in Matlab for the Simulation of Power-System Transients," 2012.

- [44] M. M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski, and R. Molag, "ATP-EMTP investigation of a new algorithm for locating faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements," *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, pp. 0–5, 2007. [Online]. Available: http://www.ipst.org/techpapers/2007/ipst_2007/paperindex.html
- [45] Y. Sun, J. Li, Z. Yin, and K. Zhu, "The Impact Analysis of Various Unbalance Factors on the PCC Voltage Imbalance," *2014 IEEE Electrical Power and Energy Conference*, pp. 23–28, 2014. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7051668>
- [46] H. L. V. Trees, "Matrix Operations," *Optimum Array Processing*, vol. 4, pp. 1340–1406, 2002.
- [47] C. L. Wadhwa, "High Voltage Engineering," *New York*, vol. 177, no. 4044, p. 392, 2007. [Online]. Available: <http://books.google.com/books?id=4rQu1M0sjRAC&pgis=1>
- [48] H. Wen, D. Cheng, Z. Teng, S. Guo, and F. Li, "Approximate Algorithm for Fast Calculating Voltage Unbalance Factor of Three-Phase Power System," vol. 10, no. 3, pp. 1799–1805, 2014.
- [49] T. Wroclaw, "Calculation of Voltage Unbalance Factor in Power System Supplying Traction Transformers."
- [50] S. Z. S. Zhong and A. Abur, "Effects of nontransposed lines and unbalanced loads on state estimation," *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, vol. 2, pp. 1–5, 2002.
- [51] "Výpočty elektrických parametrov vedenia 2x400 kv typu donau," mar 2009.

Appendix A

Odvedenie aproximovaných vzťahov indukcie vedenia

Vlastná indukcia vedenia sa skladá z vnútornej zložky (vo vnútri vodiča) L_{int} , vonkajšej zložky (v okolí vodiča) L_{ext} a magnetický indukčný tok v zemi rešpektuje zložka L_g . Tieto súčasti vyzerajú nasledovne:

$$L_{i_int} = \frac{\mu_0 \mu_{r_int}}{8\pi} \quad (4.1)$$

$$L_{i_ext} = \frac{\mu_0 \mu_{r_ext}}{2\pi} \ln \frac{h_i}{r_i} \quad (4.2)$$

$$L_{i_g} = \frac{\mu_0 \mu_{r_ext}}{2\pi} \ln \frac{D_g}{h_i} \quad (4.3)$$

$$L_{ii} = L_{i_int} + L_{i_ext} + L_{i_g} = \frac{\mu_0 \mu_{r_int}}{8\pi} + \frac{\mu_0 \mu_{r_ext}}{2\pi} \ln \frac{h_i}{r_i} + \frac{\mu_0 \mu_{r_ext}}{2\pi} \ln \frac{D_g}{h_i} \quad (4.4)$$

$$L_{ii} = \frac{\mu_0 \mu_{r_ext}}{2\pi} \left(\frac{\mu_{r_int}}{4} + \ln \frac{D_g}{r_i} \right) = \frac{\mu_0 \mu_{r_ext}}{2\pi} \ln \frac{D_g}{\xi r_i} \quad [H.m^{-1}] \quad (4.5)$$

Po upravení do takejto podoby, môžeme výraz ešte priblížiť našim potrebám, a to zmenu dĺžkovej miery na $[km]$ a aproximovaní jedného člena nasledovne:

$$L_{ii} \approx 2.10^{-4} \ln \frac{D_g}{\xi r_i} \quad [H.km^{-1}] \quad (4.6)$$

A podobne aj:

$$L_{ik} \approx 2.10^{-4} \ln \frac{D_g}{D_{ik}} \quad [H.km^{-1}] \quad (4.7)$$

Použité konštanty

μ_0	- permeabilita vákua	$[H.m^{-1}]$
μ_{r_int}	- pomerná permeabilita materiálu vodiča	$[H.m^{-1}]$
μ_{r_ext}	- pomerná permeabilita izolantu	$[H.m^{-1}]$
ξ	- parameter lana	$[-]$

Hodnoty použitých konštánt

μ_0	$= 4\pi.10^{-4}$	$[H.km^{-1}]$
μ_{r_int}	≈ 1	$[H.km^{-1}]$
μ_{r_ext}	≈ 1	$[H.km^{-1}]$
ξ	$= 0,7788$	$[-]$

Appendix B

Vzt'ahy na výpočet vybraných elektrických parametrov transponovaných vedení

Trojfázové jednosystémové vedenie bez zemného lana:

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \frac{R_1}{n} + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \left(3 \cdot \ln \frac{D}{r_{zv}} + \frac{1}{4n} \right) \quad [\Omega \cdot km^{-1}] \quad (4.8)$$

$$\bar{Z}_0 = R_1 + 3 \cdot R_g + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \left(3 \cdot \ln \frac{D_g}{\sqrt{r \cdot D^2}} + 0,25 \cdot \mu_v \right) \quad [\Omega \cdot km^{-1}] \quad (4.9)$$

$$C = \frac{1}{p - p_v} \quad [F \cdot km^{-1}] \quad (4.10)$$

$$C_0 = \frac{1}{p + 2p_v} \quad [F \cdot km^{-1}] \quad (4.11)$$

$$C_{vz} = C \cdot C_0 \cdot p_v \quad [F \cdot km^{-1}] \quad (4.12)$$

Trojfázové dvojsystémové vedenie bez zemného lana:

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \frac{R_1}{n} + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{D \cdot D_{MN}}{r_{zv} \cdot D_{NN}} + \frac{1}{4n} \right) \quad [\Omega \cdot km^{-1}] \quad (4.13)$$

$$\bar{Z}_0 = R_1 + 6 \cdot R_g + j\omega 2 \cdot 10^{-4} \left(3 \cdot \ln \frac{D_g^2}{\sqrt{r \cdot D^2 \cdot D_{NN} \cdot D_{MN}}} + 0,25 \cdot \mu_v \right) \quad [\Omega \cdot km^{-1}] \quad (4.14)$$

$$C = \frac{1}{(p + p_{NN}) - (p_v + p_{MN})} \quad [F \cdot km^{-1}] \quad (4.15)$$

$$C_0 = \frac{1}{(p + p_{NN}) + 2(p_v + p_{MN})} \quad [F \cdot km^{-1}] \quad (4.16)$$

$$C_{vz} = C.C_0.(p_v + p_{MN}) \quad [F.km^{-1}] \quad (4.17)$$

Kde indexy súhlasia s použitými v dokumente. Malé a veľké písmená v nich rozlišujú systémy, pokiaľ sa jedná o dvojsystém. Apostrofy symbolizujú obrazy daných systémov v zemi. Teda $D_{aB'}$ definuje vzdialenosť od vodiča jedného systému ' a ' k obrazu vodiča ' B ' druhého systému v zemi, podľa teoretických základov Carsona [1], znázornených aj na Obr. 1.1. Ostatné vstupné parametre sa dopočítajú ako:

$$D = \sqrt[3]{D_{ab}.D_{bc}.D_{ca}}$$

$$D_{NN} = \sqrt[3]{D_{aA}.D_{bB}.D_{cC}}$$

$$D_{MN} = \sqrt[3]{D_{aB}.D_{bC}.D_{cA}}$$

$$h = \sqrt[3]{h_a h_b h_c}$$

$$p = 18.10^6 \ln \frac{2h}{r}$$

$$p_v = 18.10^6 \ln \frac{\sqrt[3]{D_{ab'}D_{ac'}D_{bc'}}}{\sqrt[3]{D_{ab}D_{ac}D_{bc}}}$$

$$p_{NN} = 18.10^6 \ln \frac{\sqrt[3]{D_{aA'}D_{bB'}D_{cC'}}}{\sqrt[3]{D_{aA}D_{bB}D_{cC}}}$$

$$p_{MN} = 18.10^6 \ln \frac{\sqrt[3]{D_{aB'}D_{aC'}D_{bC'}}}{\sqrt[3]{D_{aB}D_{aC}D_{bC}}}$$

Viac vzťahov, ktoré sú priamo aplikovateľné na špecifické vedenia možno nájsť v knihe Vonkajšie Elektrické Vedenia od Fecka a kol. [9]. Ako vidno, tieto vzťahy sú veľmi jednoduché na výpočet, čo ich predurčuje na rýchle výpočty. Predpokladáme v nich však dokonalú transpozíciu vedenia. Tá však takmer nikdy nie je splnená. Tento aspekt zahŕňa chybu do výsledkov, ktorá je daňou za ich nenáročnosť.

Appendix C

Zoznam a popis vytvorených funkcií v programe

V programe ELPAM MultiGeo som vytvoril viacero funkcií, ktoré uľahčujú a systematizujú celý proces výpočtu elektrických parametrov. V tejto prílohe ich vymenujem, popíšem ich úlohu v programe a ukážem priamo ich zdrojový kód v programe.

Názov funkcie	Úloha v programe
complex_inverse	vytvorenie komplexnej inverznej matice
real_inverse	vytvorenie reálnej inverznej matice
vzdialenost	vyrátanie vzdialeností medzi dvoma vodičmi
obrazyMM	vyrátanie vzdialenosti vodiča od jeho vlastného obrazu v zemi
obrazyMK	vyrátanie vzdialenosti vodiča od obrazu iného vodiča v zemi
zvazok	zahrnutie zväzkového vodiča do výpočtu
LKK	vypočítanie vlastnej indukcie vodiča
LKM	vypočítanie vzájomnej indukcie dvoch vodičov
LZLZL	vypočítanie vlastnej indukcie zemného lana
PKK	vypočítanie vlastného potenciálového koeficientu vodiča
PKM	vypočítanie vzájomného potenciálového koeficientu vodiča
PZLZL	vypočítanie vlastného potenciálového koeficientu zemného lana
polar2rect1	prevod jednej komplexnej hodnoty na rektangulárne súradnice
rect2polar1	prevod jednej komplexnej hodnoty na polárne súradnice
KronReduction	vykonáva na reálnej matici Kronovu Redukciu
KronReductionComplex	vykonáva na komplexnej matici Kronovu Redukciu
R_Compensate	kompensácia skin efektu vodiča

Tabuľka 4.15: Zoznam funkcií použitých v programe a ich úlohy

V nasledujúcej časti ukážem zdrojové kódy jednotlivých funkcií, prípadne popíšem detaily ak bude potrebné.

a) **complex_inverse**

```

subroutine complex_inverse(A, M, N, Ainv)
    integer :: i, j, error
    integer, intent(in) :: M, N
    integer :: LDA, INFO, LWORK
    integer, allocatable :: IPIV(:)
    complex*16, allocatable, intent(out) :: Ainv(:, :)
    complex*16, intent(in) :: A(M, N)
    complex*16, allocatable :: WORK(:)

    allocate(WORK(N), IPIV(N), Ainv(M, N), stat = error)
    if (error .ne. 0) then
        print *, "error: not enough memory"
        stop
    end if

    LDA = M
    Ainv = A
    call ZGETRF(M, N, Ainv, LDA, IPIV, info)
    !! potrebne pre hodnotu IPIV, ktora vstupuje do ZGETRI

    LWORK = M
    call ZGETRI(N, Ainv, LDA, IPIV, WORK, LWORK, info)

    deallocate(WORK, IPIV)
end subroutine complex_inverse

```

Pre funkciu `complex_inverse` je potrebné použiť knižnicu LAPACK⁸ - z nej sú použité

⁸*Linear Algebra Package*

ZGETRF a ZGETRI funkcie. Bližšie popísané priamo na stránke⁹ projektu LAPACK.

b) real_inverse

```
subroutine real_inverse(A, M, N, Ainv)
    integer :: i, j, error
    integer, intent(in) :: M, N
    integer :: LDA, INFO, LWORK
    integer, allocatable :: IPIV(:)
    real*8, allocatable, intent(out) :: Ainv(:, :)
    real*8, intent(in) :: A(M, N)
    real*8, allocatable :: WORK(:)

    allocate(WORK(N), IPIV(N), Ainv(M, N), stat = error)
    if (error .ne. 0) then
        print *, "error: not enough memory "
        stop
    end if

    LDA = M
    Ainv = A
    call DGETRF(M, N, Ainv, LDA, IPIV, info)
    !! potrebne pre hodnotu IPIV, ktora vstupuje do SGETRI

    LWORK = M
    call DGETRI(N, Ainv, LDA, IPIV, WORK, LWORK, info)

    deallocate(WORK, IPIV)
end subroutine real_inverse
```

Ako je vidno, opäť pracujeme s knižnicou LAPACK. Platí teda to isté čo pre funkciu complex_inverse.

⁹www.netlib.org/lapack

c) vzdialenost

```

subroutine vzdialenost(dd1, dd2, hh1, hh2, vzdial)
    real, intent(in) :: dd1, dd2, hh1, hh2
    real, intent(out) :: vzdial
    vzdial = sqrt((hh1 - hh2)**2 + (dd1 - dd2)**2)
end subroutine vzdialenost

```

d) obrazyMM

```

subroutine obrazyMM(hh1,hc,vzdial)
    real, intent(in) :: hh1
    complex*16, intent(in) :: hc
    complex*16, intent(out) :: vzdial
    vzdial = 2*hh1+2*hc
end subroutine obrazyMM

```

e) obrazyMK

```

subroutine obrazyMK(dd1,dd2,hh1,hh2,hc,vzdial)
    real, intent(in) :: dd1,dd2,hh1, hh2
    complex*16, intent(in) :: hc
    complex*16, intent(out) :: vzdial
    vzdial = zsqrt((dcmplx(hh1+hh2,0)+2*hc)**2+dcmplx((dd1-dd2)**2,0))
end subroutine obrazyMK

```

f) zvazok

```

subroutine zvazok(a, nv, r, teta, rzv, rezv)
    real, intent(in) :: a, nv, r, teta
    real, intent(out) :: rzv, rezv
    real :: ro
    ro=a/(2*sin(3.14159/nv))
    rzv=(nv*r*(ro**(nv-1)))**(1/nv)
    rezv=((teta)**(1/nv))*rzv
end subroutine zvazok

```

g) LKK

```

subroutine LKK(hc,hk,rezv,L)
    !! pre fazove vodice
    complex*16, intent(in) :: hc
    real, intent(in) :: rezv,hk
    complex*16, intent(out) :: L
    complex*16 :: X
    X=(2*(dcmplx(hk,0)+hc))/dcmplx(rezv,0)
    L=0.0002*2*3.14159*50*
    dcplx(log(sqrt(real(X)**2+aimag(X)**2)),atan2(aimag(X),real(X)))
end subroutine LKK

```

h) LKM

```

subroutine LKM(Dkm,dkmobr,L)
    !! pre fazove vodice aj zemne lana
    complex*16, intent(in) :: Dkm
    complex*16, intent(in) :: dkmobr
    complex*16, intent(out) :: L
    complex*16 :: X
    X=Dkm/dkmobr
    L = 0.0002*2*3.14159*50*
    dcplx(log(sqrt(real(X)**2+aimag(X)**2)),atan2(aimag(X),real(X)))
end subroutine LKM

```

i) LZLZL

```

subroutine LZLZL(hk,hc,rzl,teta,L)
    !! len pre zemne lana
    complex*16, intent(in) :: hc
    real, intent(in) :: rzl, teta, hk
    complex*16, intent(out) :: L
    complex*16 :: X
    X=(2*(dcmplx(hk,0)+hc))/dcmplx(teta*rzl,0)

```

```

        L = 0.0002*2*3.14159*50*
        dcmplx(log(sqrt(real(X)**2+aimag(X)**2)),atan2(aimag(X),real(X)))
        !! omega.2.10e-4.ln()
end subroutine LZLZL

```

j) PKK

```

subroutine PKK(hk,rzv,P)
    !! pre fazove vodice
    real, intent(in) :: hk,rzv
    real*8, intent(out) :: P
    P = 17955643.5 * log(abs(2*hk/rzv))
end subroutine PKK

```

k) PKM

```

subroutine PKM(dkmx, dkm, P)
    !! pre fazove vodice aj zemne lana
    real, intent(in) :: dkmx, dkm
    real*8, intent(out) :: P
    P = 17955643.5 * log(abs(dkmx/dkm))
end subroutine PKM

```

l) PZLZL

```

subroutine PZLZL(hzl,rzl,Pzl)
    !! pre zemne lana
    real, intent(in) :: hzl,rzl
    real*8, intent(out) :: Pzl
    Pzl = 17955643.5 * log(abs(2*hzl/rzl))
end subroutine PZLZL

```

m) polar2rect1

```

subroutine polar2rect1(velkost, uhol, vystup)
    real*8, intent(in) :: velkost, uhol
    complex*16, intent(out) :: vystup

```

```

double precision, allocatable :: realna, imaginarna

allocate(realna, imaginarna, stat = error)
if (error .ne. 0)then
    print *, "error: not enough memory"
    stop
end if

realna = velkost * cos(uhol)
imaginarna = velkost * sin(uhol)
vystup = dcplx(realna, imaginarna)

deallocate(realna, imaginarna)
end subroutine polar2rect1

```

n) rect2polar1

```

subroutine rect2polar1(vstup, velk, uhol)
    real*8, intent(out) :: velk, uhol
    complex*16, intent(in) :: vstup
    double precision, allocatable :: realna, imaginarna

    allocate(realna, imaginarna, stat = error)
    if (error .ne. 0)then
        print *, "error: not enough memory"
        stop
    end if

    realna = real(vstup)
    imaginarna = aimag(vstup)
    velk = dsqrt((realna**2)+(imaginarna**2))
    uhol = datan(imaginarna/realna)

    deallocate(realna, imaginarna)

```

```
end subroutine rect2polar1
```

o) KronReduction

```
subroutine KronReduction(Pmain,M,N,Pfin) !! kronova redukcia matic
    real*8, intent(in) :: Pmain(M+N,M+N)
    real*8, intent(out) :: Pfin(N,N)
    integer, intent(in) :: M,N
    real*8, allocatable :: Pff(:, :), Pzz(:, :), Pzz2(:, :)
    real*8, allocatable :: Pfz(:, :), Pzf(:, :), Pred(:, :)

    allocate(Pff(N,N), Pzz(M,M), Pzz2(M,M), Pfz(N,M), Pzf(M,N), Pred(N,N))

    !! vyclenovanie z "hlavnej" matice
    Pff=Pmain(1:N,1:N)
    Pfz=Pmain(1:N, (N+1):)
    Pzf=Pmain((N+1):, 1:N)
    Pzz=Pmain(N+1:N+M, N+1:N+M)
    call real_inverse(Pzz,M,M,Pzz2)
    Pred=MATMUL(MATMUL(Pfz,Pzz2),Pzf)
    Pfin=Pff-Pred
    deallocate(Pff,Pzz,Pfz,Pzf,Pred,Pzz2)
end subroutine
```

p) KronReductionComplex

```
subroutine KronReductionComplex(Pmain,M,N,Pfin) !! kronova redukcia matic
    complex*16, intent(in) :: Pmain(M+N,M+N)
    complex*16, intent(out) :: Pfin(N,N)
    integer, intent(in) :: M,N
    complex*16, allocatable :: Pff(:, :), Pzz(:, :), Pzz2(:, :)
    complex*16, allocatable :: Pfz(:, :), Pzf(:, :), Pred(:, :)

    allocate(Pff(N,N), Pzz(M,M), Pzz2(M,M), Pfz(N,M), Pzf(M,N), Pred(N,N))
```



```

!! vyclenovanie z "hlavnej" matice
Pff=Pmain(1:N,1:N)
Pffz=Pmain(1:N,(N+1):)
Pzf=Pmain((N+1):,1:N)
Pzz=Pmain(N+1:N+M,N+1:N+M)

call complex_inverse(Pzz,M,M,Pzz2)
Pred=MATMUL(MATMUL(Pffz,Pzz2),Pzf)
Pfin=Pff-Pred
deallocate(Pff,Pzz,Pffz,Pzf,Pred,Pzz2)
end subroutine

```

q) R_Compensate

```

subroutine R_Compensate(Rdc,TD,f,Rac)
    real, intent(in) :: Rdc
    real, intent(in) :: TD
    real, intent(in) :: f
    real, intent(out) :: Rac
    real :: Tdata(16)
    real :: Terr(16)
    real :: MinErr, param
    integer :: i,pos

    !! urcenie TD dat
    Tdata(1)=0.04
    Tdata(2)=0.05
    Tdata(3)=0.06
    Tdata(4)=0.07
    Tdata(5)=0.08
    Tdata(6)=0.09
    Tdata(7)=0.1
    Tdata(8)=0.12
    Tdata(9)=0.15

```

```

Tdata(10)=0.2
Tdata(11)=0.25
Tdata(12)=0.3
Tdata(13)=0.35
Tdata(14)=0.4
Tdata(15)=0.45
Tdata(16)=0.5

MinErr=1000
pos=1000

do i=1,16
    Terr(i)=abs(Tdata(i)-TD)
    if (MinErr>Terr(i))then
        MinErr=Terr(i)
        pos=i
    end if
end do

param=sqrt(f/(Rdc*0.621371192))

if(pos==1)then
    Rac=Rdc*(1e-7*param**3 - 4e-6*param**2 + 3e-5*param + 1)
else if(pos==2)then
    Rac=Rdc*(4e-8*param**3 + 8e-7*param**2 - 1e-5*param + 1)
else if(pos==3)then
    Rac=Rdc*(9e-8*param**3 - 1e-6*param**2 + 7e-6*param + 1)
else if(pos==4)then
    Rac=Rdc*(2e-7*param**3 - 5e-6*param**2 + 5e-5*param + 1)
else if(pos==5)then
    Rac=Rdc*(2e-7*param**3 - 4e-6*param**2 + 2e-5*param + 1)
else if(pos==6)then

```

```

        Rac=Rdc*(3e-7*param**3 - 1e-5*param**2 + 9e-5*param + 1)
else if(pos==7)then
        Rac=Rdc*(4e-7*param**3 - 1e-5*param**2 + 1e-4*param + 1)
else if(pos==8)then
        Rac=Rdc*(5e-7*param**3 - 1e-5*param**2 + 1e-4*param + 1)
else if(pos==9)then
        Rac=Rdc*(9e-7*param**3 - 3e-5*param**2 + 2e-4*param + 1)
else if(pos==10)then
        Rac=Rdc*(1e-6*param**3 - 3e-5*param**2 + 2e-4*param + 1)
else if(pos==11)then
        Rac=Rdc*(2e-6*param**3 - 5e-5*param**2 + 4e-4*param + 1)
else if(pos==12)then
        Rac=Rdc*(3e-6*param**3 - 6e-5*param**2 + 3e-4*param + 1)
else if(pos==13)then
        Rac=Rdc*(3e-6*param**3 - 7e-5*param**2 + 4e-4*param + 1)
else if(pos==14)then
        Rac=Rdc*(4e-6*param**3 - 7e-5*param**2 + 3e-4*param + 1)
else if(pos==15)then
        Rac=Rdc*(5e-6*param**3 - 1e-4*param**2 + 7e-4*param + 1)
else if(pos==16)then
        Rac=Rdc*(5e-6*param**3 - 9e-5*param**2 + 5e-4*param + 1)
end if

```

```

end subroutine R_Compensate

```