



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PROGRAM PRO VÝPOČET ODPORU ZEMNÍCÍCH SOUSTAV

PROGRAM FOR CALCULATING THE RESISTANCE OF EARTHING SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Roman Gura

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Vyčítal, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Roman Gura

ID: 243446

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Program pro výpočet odporu zemnicích soustav

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis teorie uzemnění
2. Popis používaných konstrukcí zemniců a jejich výpočet
3. Tvorba programu pro výpočet uzemnění zemnicích soustav v programu Matlab/Python/VBA
4. Výpočet zemnicích soustav z bodu 2 pomocí vytvořeného programu a porovnání výsledků
5. Popis a shrnutí výsledků, tvorba dokumentace vytvořeného programu

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Václav Vyčítal, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá problematikou zemniacich sústav, ktoré sú zásadné pre bezpečnosť a spoľahlivosť elektrických inštalácií. Cieľom práce je vyvinúť softvérový nástroj na výpočet parametrov zemniacich sústav na základe ich geometrických rozmerov, a to v súlade s podnikovými normami. Výsledný program automatizuje výpočty pomocou intuitívneho grafického rozhrania vrátane zobrazenia sústavy.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Odpor, potenciál, elektróda, sústava, program, pôda.

ABSTRACT

The bachelor's thesis addresses the issue of grounding systems, which are essential for the safety and reliability of electrical installations. The aim of this thesis is to develop a software tool for calculating the parameters of grounding systems based on their geometric dimensions, in accordance with corporations' norms. Resulting program automates the calculations using an intuitive graphic interface including the display of the system.

KEYWORDS

Resistance, potential, electrode, system, program, ground.

GURA, Roman. *Program pro výpočet odporu zemních soustav*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2024, 67 s. Bakalářská práce. Vedúci práce: Ing. Václav Vyčítal, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Roman Gura
VUT ID autora: 243446
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2023/24
Téma záverečnej práce: Program pro výpočet odporu zemnicích soustav

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Václavovi Vyčítalovi, PhD. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy pri písaní tejto práce.

Obsah

Úvod	11
1 Teória uzemnenia	12
1.1 Nulový potenciál	12
1.2 Rezistivita pôdy	12
1.3 Počasie	12
1.4 Dôvody používania uzemnenia	13
1.5 Požiadavky na uzemnenie	13
1.5.1 Zemný odpor	13
1.5.2 Napätie na uzemňovacej sústave	14
1.5.3 Dotykové napätie	14
1.5.4 Prúdová zafažiteľnosť	14
2 Používané konštrukcie zemničov a ich výpočet	16
2.1 Pásové a tyčové zemniče	19
2.2 Prstencový (obvodový zemnič)	26
2.3 Dosková elektróda	29
2.4 Lúčový zemnič	33
2.5 Sústava tyčových elektród	34
2.6 Prehľad odvodených vzťahov pre zemniče	37
3 Príklad výpočtu a overenie výsledkov	39
3.1 Manuálny výpočet celkového odporu sústavy	39
3.1.1 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 5 [1]	40
3.1.2 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 4 [2]	41
3.1.3 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 3 [3]	42
3.2 Programové výsledky celkového odporu sústavy	43
3.2.1 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 5 [1]	43
3.2.2 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 4 [2]	46
3.2.3 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 3 [3]	49
3.3 Maximálne krokové napätie pre jednoduchý zemnič	51
3.4 Stanovenie modelu pôdy na základe Wennerovho merania	53
4 Dokumentácia programu a manuál	56
4.1 Karta Kruhové	57
4.2 Karta Nekruhové	59
4.3 Karta Jednoduché tvary	60
4.4 Karta Využitie tyčovej sústavy	60

4.5 Karta Wennerovo meranie	61
Záver	62
Literatúra	63
Zoznam symbolov a skratiek	65
A Prílohy	67
A.1 Report vygenerovaný programom	67

Zoznam obrázkov

2.1	Polguľová elektróda	17
2.2	Dve paralelné guľové elektródy	18
2.3	Priebeh potenciálu vodorovne pozdĺžnej elektródy	22
2.4	Prstencový zemnič	27
2.5	Priebeh potenciálu prstencového zemniča	28
2.6	Priebeh potenciálu kruhovej dosky	31
2.7	Prúdová hustota na kruhovej doske	32
2.8	Kruhová doska v hĺbke h	33
2.9	Lúčový zemnič	34
2.10	Sústava tyčí	36
3.1	Zvolená sústava pre výpočet	39
3.2	Obvodový zemnič 1 podľa [1]	43
3.3	Obvodový zemnič 2 podľa [1]	44
3.4	Kombinácia obvodových zemničov podľa [1]	44
3.5	Koeficient využitia tyčovej sústavy podľa [1]	45
3.6	Výpočet tyčovej sústavy podľa [1]	45
3.7	Výpočet celej sústavy 3.1 podľa [1]	46
3.8	Obvodový zemnič 1 podľa [2]	46
3.9	Obvodový zemnič 2 podľa [2]	47
3.10	Kombinácia obvodových zemničov podľa [2]	47
3.11	Koeficient využitia tyčovej sústavy podľa [2] a [3]	48
3.12	Výpočet celej sústavy 3.1 podľa [2]	49
3.13	Obvodový zemnič 1 podľa [3]	49
3.14	Obvodový zemnič 2 podľa [3]	50
3.15	Kombinácia obvodových zemničov podľa [3]	50
3.16	Výpočet celej sústavy 3.1 podľa [3]	51
3.17	Maximálne krokové napätie	52
3.18	Model LoH s viacerými rozostupmi podľa [4] a [1]	53
3.19	Model HoL s viacerými rozostupmi podľa [4] a [1]	54
3.20	Homogénny model s viacerými rozostupmi podľa [4] a [1]	54

Zoznam tabuliek

2.1	Odpor podlhovastého zemniča uloženého vodorovne v zemi [5, s. 681]	23
2.2	Prehľad odvodených vzťahov I.	37
2.3	Prehľad odvodených vzťahov II.	38
3.1	Prehľad výsledkov manuálnym a programovým výpočtom	51
3.2	Viac rozstupov	53

Úvod

Uzemňovacie systavy sú základnou časťou elektrických sústav. Ich funkciou nie je len zabezpečiť správnu prevádzku zariadenia, ale taktiež ochrániť toto zariadenie a v neposlednom rade osobu vyskytujúcu sa v okolí zariadenia v prípade poruchy. Osoba by mala byť ochránená pred nebezpečným dotykovým a krokovým napätím. Preto je nevyhnutný správny návrh uzemňovacej sústavy.

V prvej časti tejto práce sa nachádzajú problémy pri návrhu, vysvetlenie pojmov, dôvody použitia uzemnení a používané konštrukcie zemničov. Hlavným obsahom tejto časti je odvodenie výpočtových vzťahov na základe geometrie a rozloženia v sústave.

Druhá časť využíva znalosti z prvej časti. Nachádza sa v nej konečný návrh programu, zoznámenie sa s vývojovým prostredím, využívanie knižníc a overenie správnosti výpočtových funkcií podľa prvej časti.

Cieľom je vytvoriť užívateľsky prívetivé prostredie, v ktorom sa bude užívateľ intuitívne orientovať. Program má slúžiť ako pomôcka pri návrhu sústavy a tým ušetriť projektantovi čas.

1 Teória uzemnenia

V nasledujúcej kapitole si vysvetlíme potrebné pojmy, aby sme boli schopní porozumieť problematike zemničov a zemnenia. Popíšeme náročnosť riešenia, rôzne vplyvy a požiadavky pre správne vyhotovenie zemniacej sústavy.

Schopnosť zeme viesť elektrický prúd nemohla ostať bez povšimnutia. Už od začiatkov inžinierstva sa táto schopnosť využívala pre vedenie spätných prúdov. Avšak po krátkom čase sa zistilo, že sústavy s takýmto riešením prinášajú určité nebezpečenstvá a problémy. [6]

1.1 Nulový potenciál

Dnes používame vodivostné vlastnosti zeme prevažne na udržanie neutrálneho bodu. Tento neutrálny bod je v mnohých prípadoch neoddeliteľnou súčasťou obvodu, aby jeho funkčnosť bola správna. Z toho vyplýva, že absencia takého bodu môže spôsobiť značné škody, a preto nemôže byť ako súčasť obvodu vynechaný. [6]

1.2 Rezistivita pôdy

Zem aj napriek tomu, že dokáže viesť prúd, nie je ideálnym vodičom. Jej hlavné komponenty, z ktorých sa skladá, sú oxid kremičitý a oxid hlinitý. Oba spomenuté oxidy majú oveľa menšiu elektrickú vodivosť ako kovy, sú priam ideálnymi izolátormi. Vodivosť spôsobujú z veľkej časti soli a vlhkosť. Zo vzorca pre odpor

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (1.1)$$

vidíme, že ak napriek vysokej rezistivite dokážeme zabezpečiť dostatočne veľký prierez, celkový odpor nám klesá. To platí aj pre polovodiče. V tomto smere, čo sa týka prierezu zeme, nie sme limitovaní vďaka jej hĺbke. [6]

Kvôli veľkému odporu pôdy je potrebné si uvedomiť, že všetky prúdy ktoré ňou pretekajú spôsobujú úbytok napätia. Preto musíme uvažovať o skutočnosti, že sa môžu vyskytnúť prípady, kedy potenciál zeme nie je vždy nula. [6]

Ideál homogénosti pôdy pod povrchom musíme vylúčiť, lebo v praxi je prostredie pod zemou veľmi členité a zložené z rôznych vodivých častí. Napríklad hlina, íl alebo vápenec majú nižšiu rezistivitu v porovnaní s pieskom alebo skalami. [6]

1.3 Počasie

Aktuálny stav počasia taktiež dokáže skomplikovať analýzu rezistivity pôdy. Ako už bolo spomenuté, vlhkosť zvyšuje vodivosť. Preto by sme iné hodnoty namerali na jar

a v lete. Nie len vlhkosť, ale aj mraz dokáže vnieť nepresnosti do určovania odporu. Týmto nepriaznivým vplyvom sa dá samozrejme do určitej miery vyhnúť napríklad umiestnením elektród do dostatočnej hĺbky a ochrániť ich proti vplyvom mrazu, ale zároveň na miesto, kde sa vyskytuje podzemná voda a zabezpečuje relatívne nemeniacu sa vlhkosť. [6]

1.4 Dôvody používania uzemnenia

Uzemnenie elektrického zariadenia je definované podľa normy ČSN 33 0050-604, ako súbor opatrení pre udržanie takého zariadenia na potenciály zeme. Autor Kočvara vo svojej knihe [7] uvádza účely zemnenia z ktorých bolo vybraných prvých päť:

- udržiavať na potenciály zeme nejakú časť elektrického obvodu,
- umožňovať funkciu elektrických strojov, prístrojov a zariadení alebo jej napomáhať,
- chrániť elektrické stroje a zariadenia pred účinkami prepätia a veľkých prúdov,
- zviest atmosferické prúdy a obmedziť prepätie,
- chrániť ľudí a zvieratá pred úrazom pri dotyku a neživých častí, ktoré môžu byť v prípade poruchy pod napätím, odpojením alebo znížením dotykového a krokového napätia na bezpečnú mieru. [5; 7]

1.5 Požiadavky na uzemnenie

Ak chceme navrhnuť sústavu, musíme zväžiť nasledujúce parametre:

- zemný odpor, ktorý chceme dosiahnuť,
- napätie, ktoré môžeme pripustiť na uzemňovacej sústave,
- dotykové a krokové napätie, ktoré môžeme pripustiť,
- prúdovú zatažiteľnosť,
- odolnosť voči korózii a mechanickému poškodeniu. [7]

1.5.1 Zemný odpor

Na to, aby sme vedeli vypočítať zemný odpor zemničov, je potrebné poznať rezistivitu pôdy. Túto hodnotu je najlepšie odmerať napríklad pomocou geoelektrických meraní. Napríklad Schlumbergerova alebo Wennerova metóda spadajú do kategórie geoelektrických meraní. Ďalšie známe metódy sú mostíková metóda alebo metóda prúd-napätie. Určovaniu rezistivity z tabuliek, literatúry a noriem by sme sa mali vyhnúť. Je to z dôvodu, že tieto zdroje uvádzajú krajné hodnoty a návrh sústavy by bol veľmi neekonomický. [7]

1.5.2 Napätie na uzemňovacej sústave

Určuje sa meraním a to konkrétne metódou prúd-napätie. Prípadne sa na jeho určenie dá použiť výpočet,

$$U_{us} = R_z \cdot I_{fault}, \quad (1.2)$$

kde U_{us} je napätie na uzemňovacej sústave, R_z je hodnota zemného odporu a I_{fault} je jednofázový prúd prechádzajúci zemničom. [7]

1.5.3 Dotykové napätie

Na ochranu pred dotykovým napätím sa používajú strojené zemniče a pre rozsiahle zariadenia sa používa mrežová sieť. Táto sieť sa môže realizovať pomocou pásoviny alebo pomocou drôtu. Pre zníženie odporu a tým aj dotykového napätia je odporúčané zhustovať mrežu len v jednom smere. Zhustovanie v oboch smeroch je neekonomické čo sa týka materiálu, ktorý na tento úkon spotrebujeme. Je to kvôli tomu, že odpor sústavy nám týmto spôsobom klesne len nepatrne v porovnaní s materiálom. [7]

Pre dôkaz budeme uvažovať mrežovú sieť s rozmermi 100 x 100 m, okami 20 x 20 m a rezistivitou pôdy 100 Ω m.

Zemný odpor mrežovej sústavy vypočítame pomocou [7]:

$$R_z = \rho \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot D} + \frac{1}{L} \right] \quad (1.3)$$

Po dosadení dostávame:

$$R_z = 100 \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 113} + \frac{1}{1200} \right] = 0,53 \quad \Omega$$

Keď zmenšíme oká na 10 x 10 m, bude zemný odpor mreže bude:

$$R_z = 100 \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 113} + \frac{1}{2200} \right] = 0,49 \quad \Omega$$

Kde ρ je rezistivita pôdy, D je stredný priemer plochy siete $D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$, S je plocha siete a L je celková dĺžka vodičov.

Zhustením mreže v oboch smeroch sa odpor mreže znížil o 7,7 % ale za cenu materiálu, ktorého spotreba vzrástla o 83 %. [7]

1.5.4 Prúdová zaťažiteľnosť

Najvyššie dovolené hustoty prúdov vzťahnuté na plochu zemniča uloženého v pôde udáva tabuľka v podnikovej norme [3, s. 9]. Ako vidíme, čím je kratší čas, tým viac

prúdu môžeme nechať vodičom pretiecť. V literatúre [7] sa dočítame, že pre rázové prúdy požadujeme čo najväčšiu hustotu.

Je to z dôvodu, že táto hustota spôsobí malé iskričky, ktoré pomáhajú prekonávať prechodový odpor v pôde. Tieto iskričky vznikajú kvôli tomu, že intenzita poľa je vyššia ako gradient pôdy. Má to pozitívny vplyv, lebo zemnič sa tvári, ako keby mal väčšie rozmery. [7] Na druhej strane v betóne máme horný limit rázového prúdu 50 kA. S touto hodnotou sa stretávame v knihe [7] aj v podnikovej norme [3].

Čo sa týka pôdy, ak to preženieme s časom trvania a veľkosťou prúdu, vytvorené nadmerné teplo sa odovzdá pôde a tá sa začne vysúšať. Ako bolo spomenuté v časti 1.3, vlhkosť zvyšuje vodivosť, no vysušenie pôdy ju znižuje. Pri takýchto podmienkach môžu vzniknúť fulgurity. Fulgurity sú nevodivé stopy. [7]

2 Používané konštrukcie zemničov a ich výpočet

Táto kapitola sa venuje rôznym geometrickým tvarom zemničov, uvádza vzorce pre výpočet a vysvetľuje ich pôvod. Vzorce sú prevzaté z literatúry [5] kvôli lepšiemu označovaniu veličín. Úvahy pre odvodenie sú prevzaté z [6; 5] pre celú kapitolu.

Na to, aby sme mohli analyticky vyjadriť vzťahy, je potrebné aplikovať niekoľko zjednodušení. Pokiaľ nie je intenzita elektrického poľa vyššia ako gradient pôdy 1.5.4, môžeme považovať mernú vodivosť za konštantu. Druhé zjednodušenie je, že uvažujeme homogennú vodivosť pôdy alebo ohraňované horizontálne vrstvy rôznych vodivostí, čo v skutočnosti nie je pravda 1.2.

Pre pochopenie si uvedieme nepoužívané typy, a to konkrétne zemniče v tvare guľ. Predstavme si **guľovú elektródu, ktorá je z polovice zapustená do zeme**. Situáciu popisuje obrázok 2.1. Ak prúd preteká takouto elektródou, vo vzdialenosti x od hemisféry (stred elektródy) je prúdová hustota

$$J = \frac{I}{2\pi x^2} \quad [\text{Am}^{-2}; \text{A}, \text{m}]. \quad (2.1)$$

Podľa Ohmovho zákona, ak je merný odpor pôdy ρ , tak v mieste x je intenzita elektrického poľa

$$E = \rho \cdot J = \frac{\rho I}{2\pi x^2} \quad [\text{Vm}^{-1}; \Omega\text{m}, \text{Am}^{-2}; \text{A}, \text{m}]. \quad (2.2)$$

Pomocou integrálu sme schopní spočítať napätie medzi bodmi a a x , kde a je polomer elektródy a x je polomer od elektródy takto

$$U = \int_a^x E dx = \int_a^x \frac{\rho I}{2\pi x^2} dx = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{x} \right) = V_a - V_x \quad [\text{V}; \text{Vm}^{-1}, \text{m}, \Omega\text{m}, \text{A}]. \quad (2.3)$$

Napätie elektródy proti zemi dostaneme tak, že budeme uvažovať bod x ako nekonečne vzdialený bod

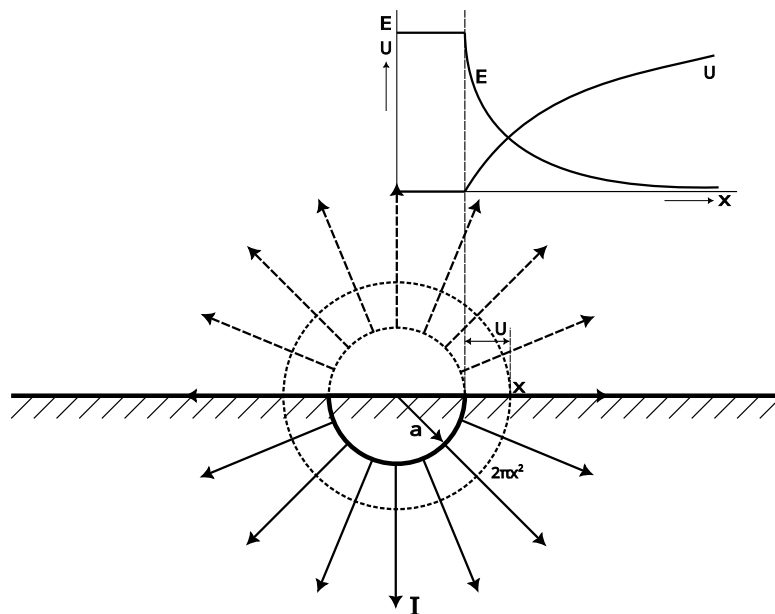
$$U_0 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x} \right) = V_a - 0 = \frac{\rho I}{2\pi a}. \quad (2.4)$$

Použitím Ohmovho zákona môžeme následne určiť odpor, ktorý kladie polguľa

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi a}. \quad (2.5)$$

Aj napriek tomu, že sa takéto tvary zemničov nepoužívajú v praxi, majú tieto vzťahy svoje využitie. Základy ocelových stožiarov sa nahrádzajú ekvivalentným polomerom gule.

Na ďalšom príklade si vysvetlíme, že pre **dve rovnaké paralelné gule** 2.2 nemôžeme vždy počítat celkový odpor ako ich paralelnú kombináciu, ale musíme



Obr. 2.1: Polgulová elektróda, prekreslené z [6, s. 3]

zvážiť vzdialenosť medzi elektródami. Je to z dôvodu toho, že sa tieto elektródy navzájom ovplyvňujú.

Máme dve guľové elektródy s polomerom a a stredy sú vzdialené $2z$. Potenciál V v bode okolo guľovej elektródy je

$$V = \frac{\rho I}{4\pi y} \quad [V; \Omega\text{m}, \text{A}, \text{m}], \quad (2.6)$$

kde I je prúd vytekajúci z gule a y vzdialenosť bodu od elektródy. Keď teda máme bod P vzdialený od prvej gule y_1 a od druhej gule y_2 , potenciál v tomto bode sa rovná

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{y_1} + \frac{1}{y_2} \right). \quad (2.7)$$

Ak uvážime bod x v strednej rovine medzi guľami ($y_1 = y_2 = y$) bude potenciál v tomto bode

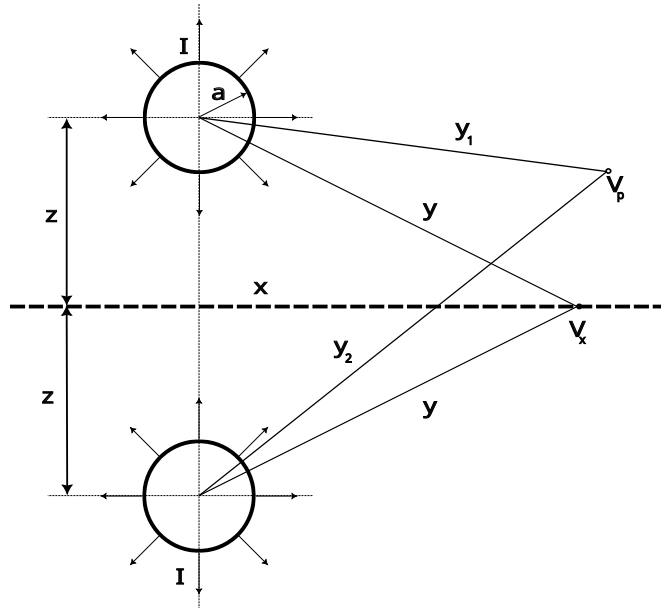
$$V_x = 2 \frac{\rho I}{4\pi y} = \frac{\rho I}{2\pi y}. \quad (2.8)$$

Výsledný potenciál povrchu gule je teda súčtom vlastného potenciálu gule a potenciálom druhej gule vzdialenej $2z$. Celkový potenciál sa rovná napätiu proti zemi

$$U_0 = V_a + V_{2z} = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{2z} \right). \quad (2.9)$$

Paralelne spojené dve rovnaké gule, ktorými preteká prúd $2I$, majú zemný odpor

$$R = \frac{U_0}{2I} = \frac{\rho}{4\pi a} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{a}{2z} \right) \quad [\Omega; \text{V}, \text{A}; \Omega\text{m}, \text{m}]. \quad (2.10)$$



Obr. 2.2: Dve paralelné guľové elektródy, prekreslené z [6, s. 5]

Keď teda zvažíme parameter z ako vzdialenosť stredov dvoch elektród a budeme uvažovať $z \rightarrow \infty$

$$R = \frac{U_0}{2I} = \frac{\rho}{4\pi a} \frac{1}{2} \left(1 + \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{a}{2z} \right) = \frac{\rho}{4\pi a} \frac{1}{2}$$

a $z = a$

$$R = \frac{U_0}{2I} = \frac{\rho}{4\pi a} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{a}{2a} \right) = \frac{\rho}{4\pi a} \frac{3}{4}$$

Dostaneme činiteľov $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$. Z toho vyplýva, že pre dostatočne vzdialené elektródy je výsledný odpor paralelnou kombináciou dvoch odporov. Pre blízke elektródy sa uplatňuje vzájomné pôsobenie a výsledný odpor je väčší ako paralelná kombinácia.

Posledným príkladom zo skupiny nepoužívaných zemničov je **jedna guľová elektróda v zemi**. Na nej si ukážeme, ako eliminovať krokové napätie na povrchu zeme.

Táto guľa je vlastne polovicou predchádzajúceho príkladu. Odpor tejto sústavy je dvakrát väčší ako v prípade dvoch guľí 2.10.

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{4\pi a} \left(1 + \frac{a}{2z} \right) \quad (2.11)$$

V blízkosti povrchu, teda $z = \frac{a}{2}$ 2.11

$$R = \frac{\rho}{4\pi a} \left(1 + \frac{a}{2z} \right) = \frac{2\rho}{4\pi a} = \frac{\rho}{2\pi a}$$

vidíme, že odpor sa rovná guľi zapustenej do polovice v zemi. Na druhej strane môžeme uvažovať, že $z \rightarrow \infty$. V tom prípade člen $\frac{a}{2z}$ zanikne a odpor je polovičný.

V každom bode na povrchu platí

$$\frac{x}{y} = \sin(\alpha) = \frac{dx}{dy}, \quad (2.12)$$

kde x je vzdialenosť bodu od stredu elektródu po horizontálnej osi a α je odpovedajúci uhol.

Intenzita poľa na povrchu je

$$E = \frac{dV_x}{dx} = \frac{dV_x}{dy} \sin(\alpha). \quad (2.13)$$

Dosadením rovnice 2.8 do 2.13 dostaneme intenzitu poľa na povrchu zeme

$$E = \frac{\rho I}{2\pi y} \frac{\sin(\alpha)}{y^2} = \frac{\rho I}{2\pi y} \frac{x}{\sqrt{(x^2 + y^2)^3}}. \quad (2.14)$$

Pre také α , ktoré je blízko 90 stupňov sa $\frac{\sin(\alpha)}{y^2} = \frac{1}{x^2}$ a pre malé hodnoty α sa $\frac{\sin(\alpha)}{y^2} = \frac{x}{z^3}$. Keď tieto hodnoty budeme uvažovať pre rovnicu 2.14, dostaneme sa k záveru, že vo väčších vzdialenostiach klesá intenzita poľa rovnako ako pre polguľu. Zvislo nad guľou sa $E = 0$ a s malými x lineárne rastie. Ďalším zaujímavým bodom je $\alpha = \sqrt{\frac{1}{3}}$, pre ktorý je intenzita poľa maximálna

$$E_{max} = \frac{\rho I}{3\sqrt{3}\pi z^2}. \quad (2.15)$$

E_{max} sa znižuje kvadraticky s hĺbkou. Preto, keď zakopeme elektródu dostatočne hlboko, eliminujeme krokové napätie na povrchu.

2.1 Pásovú a tyčové zemniče

Tieto zemniče sa vyznačujú tým, že majú malý priemer v porovnaní s ich dĺžkou. Zemný odpor preto môžeme vypočítať tak, že budeme riešiť pole priamkovej elektródy v neobmedzenom priestore. V prvom kroku si takúto elektródu s dĺžkou $2l$ rozdelíme na elementy. Z elektródy rovnomerne vyteká prúd $2I$. To znamená, že každý element odvádza $2I \frac{d\xi}{2l}$. Vo všeobecnom bode $P(x, y)$ sa vďaka pôsobeniu prúdu vytvorí potenciál

$$dV_{xy} = \frac{\rho}{4\pi r_p} 2I \frac{d\xi}{2l} = \frac{\rho}{8\pi l} 2I \frac{d\xi}{\sqrt{x^2 + (y - \xi)^2}} \quad [V; \Omega m, m, A]. \quad (2.16)$$

Pomocou integrálu dostaneme celkový potenciál v bode P

$$V_{xy} = \frac{\rho}{8\pi l} 2I \int_{-l}^l \frac{d\xi}{\sqrt{x^2 + (y - \xi)^2}} = \frac{\rho}{8\pi l} 2I \ln \left(\frac{y + l + \sqrt{x^2 + (y + l)^2}}{y - l + \sqrt{x^2 + (y - l)^2}} \right). \quad (2.17)$$

Pre guľovú elektródu platí, že má rovnaký potenciál na ploche so stredom v strede elektródy. Pre priamku na druhej strane sú potenciálové ohniská na koncoch priamky. Na predĺžený zemnič sa môžeme dívať ako na ekvipotenciálnu plochu, ktorej dĺžka je o niečo väčšia ako dĺžka zemniča. Na základe tohto poznatku si môžeme dovoliť obe dĺžky stotožniť.

Majme valcovú elektródu, ktorej polomer a je uprostred dĺžky elektródy a teda $y = 0$, $x = a$. Pre povrch elektródy môžeme napísať

$$\ln \left(\frac{y + l + \sqrt{x^2 + (y + l)^2}}{y - l + \sqrt{x^2 + (y - l)^2}} \right) = \ln \left(\frac{l + \sqrt{a^2 + l^2}}{-l + \sqrt{a^2 + l^2}} \right). \quad (2.18)$$

Ako bolo spomenuté, vďaka vlastnosti, že priemer elektródy je oveľa menší v porovnaní s dĺžkou, využijeme túto vlastnosť pri odvodzovaní. Keďže $2a \ll 2l$, pomocou binomického rozvoja môžeme upraviť vzťah 2.18 na

$$\ln \left(\frac{l + \sqrt{a^2 + l^2}}{-l + \sqrt{a^2 + l^2}} \right) \doteq \ln \left(\frac{2l}{a} \right)^2 = 2 \ln \left(\frac{2l}{a} \right) \quad (2.19)$$

Po dosadení do rovnice 2.17 dostaneme potenciál povrchu elektródy, ktorý sa rovná napätiu elektródy proti zemi

$$U_0 = \frac{\rho}{4\pi l} 2I \ln \left(\frac{2l}{a} \right). \quad (2.20)$$

Pre elektródu zakopanú nekonečne hlboko má odpor hodnotu

$$R = \frac{U_0}{2I} = \frac{\rho}{4\pi l} \ln \left(\frac{2l}{a} \right) \quad [\Omega; \text{V, A}; \Omega\text{m, m}]. \quad (2.21)$$

Pre elektródu na povrchu platí

$$R' = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{2l}{a} \right), \quad (2.22)$$

keďže prúd môže vytekať len z polovice plochy elektródy, tak je odpor dvakrát väčší.

Uvedme si príklad. Chceme vypočítať zemný odpor vodiča R . Poznáme polomer $a = 1$ cm, čo sa podobá pásovine 30x4 mm, dĺžka $2l = 30$ m a je uložený pri povrchu v pôde $\rho = 100$ Ωm . Pri výpočte nám pomôže vzťah 2.22

$$R = \frac{100}{\pi \cdot 30} \ln \left(\frac{30}{0,01} \right) = 8,5 \quad \Omega$$

V smere osi y pre vodič ležiaci na povrchu sme schopní rovnicou 2.17 získať priebeh potenciálu od kraja vodiča,

$$V_y = \frac{\rho I}{4\pi l} \ln \left(\frac{y + l}{y - l} \right) \quad (2.23)$$

V tomto smere je maximálne krokové napätie pri $y = \sqrt{l^2 + a^2} + \frac{s}{2}$, čiže priamo pri elektróde,

$$(U_{k,max})_y = V_{y-\frac{s}{2}} - V_{y+\frac{s}{2}} = \frac{\rho I}{4\pi l} \left(\ln \left(\frac{\sqrt{l^2 + a^2} + l}{\sqrt{l^2 + a^2} - l} \right) - \ln \left(\frac{\sqrt{l^2 + a^2} + l + s}{\sqrt{l^2 + a^2} - l + s} \right) \right). \quad (2.24)$$

Keďže $a \ll l$, pomocou binomického rozvoja

$$(U_{k,max})_y \doteq \frac{\rho I}{4\pi l} \left(\ln \left(\frac{4l^2}{a^2} \right) - \ln \left(\frac{2l + s}{s} \right) \right) = \frac{\rho I}{2\pi l} \ln \left(\frac{2l}{a} \sqrt{\frac{s}{2l + s}} \right). \quad (2.25)$$

Ďalšou skutočnosťou je, že $2l \gg s$, a preto môžeme rovnicu 2.25 zjednodušiť

$$(U_{k,max})_y = \frac{\rho I}{2\pi l} \ln \left(\frac{\sqrt{2ls}}{a} \right). \quad (2.26)$$

Predpokladajme dĺžku kroku $s = 1$ m, potom pomer maximálneho krokového napätia $(U_{k,max})_y$ a celkového napätia U_0 proti zemi je

$$\left(\frac{U_{k,max}}{U_0} \right)_y = \frac{\ln \left(\sqrt{\frac{2l}{a}} \right)}{\ln \left(\frac{2l}{a} \right)}. \quad (2.27)$$

Napríklad pre zemnič s dĺžkou $2l = 30$ m a polomerom $a = 5$ cm v smere vodiča

$$\left(\frac{U_{k,max}}{U_0} \right)_y = \frac{\ln \left(\frac{\sqrt{30}}{0,01} \right)}{\ln \left(\frac{30}{0,01} \right)} = 0,79$$

a v smere kolmo na stred vodiča

$$\left(\frac{U_{k,max}}{U_0} \right)_{x0} = \frac{\ln \left(\frac{1}{0,01} \right)}{\ln \left(\frac{30}{0,01} \right)} = 0,58.$$

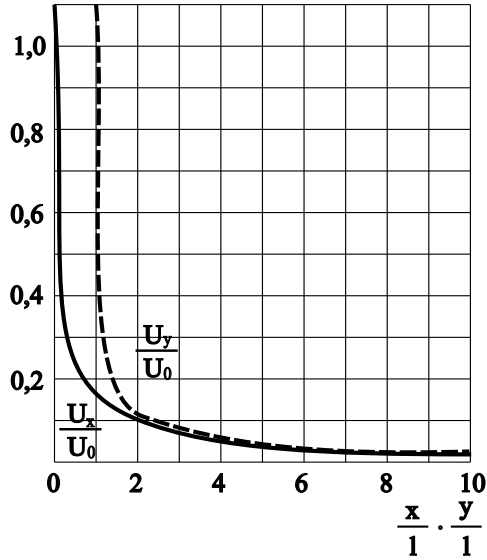
Najväčšia hodnota krokového napätia sa vyskytuje po krajoch zemniča v smere jeho dĺžky. Je to spôsobené tým, že sa náboj prirodzene koncentruje na týchto miestach.

Majme prúd $I = 100$ A, rezistivitu pôdy $\rho = 100$ Ω m. V takomto prípade sa napätie $(U_{k,max})_y$ vypočíta

$$(U_{k,max})_y = 0,79 \cdot 8,5 \cdot 100 = 670 \text{ V}$$

Ak chceme vypočítať odpor zemniča, je vhodné postupovať tak, že využijeme metódu zrkadlenia. Predstavenie zrkadlového obrazu môžeme vidieť na obrázku 2.3. Uvažujme prúd I . Podľa rovnice 2.20 vypočítame ako prvé vlastný potenciál vodiča

$$V = \frac{\rho I}{4\pi l} \ln \left(\frac{2I}{a} \right). \quad (2.28)$$



Obr. 2.3: Priebeh potenciálu vodorovne pozdĺžnej elektródy v dvoch hlavných smeroch, prekreslené z [5, s. 680]

V tomto prípade zvolíme $y = 0, x = 2h$ a teda potenciál bude

$$V' = \frac{\rho I}{8\pi l} \ln \left(\frac{l + \sqrt{(2h)^2 + l^2}}{-l + \sqrt{(2h)^2 + l^2}} \right). \quad (2.29)$$

Opäť môžeme použiť binomický rozvoj, ak dĺžka pásu $2l$ je veľká v porovnaní s hĺbkou zemniča v zemi.

$$\ln \left(\frac{l + \sqrt{(2h)^2 + l^2}}{-l + \sqrt{(2h)^2 + l^2}} \right) \doteq 2 \ln \left(\frac{2l}{2h} \right). \quad (2.30)$$

V tomto prípade sa celkový potenciál rovná súčtu vlastného potenciálu a potenciálu zrkadlového obrazu, a to je rovné napätiu proti zemi

$$U_0 = V + V' = \frac{\rho}{4\pi l} \left(\ln \left(\frac{2l}{a} \right) + \ln \left(\frac{l}{h} \right) \right). \quad (2.31)$$

Zemný odpor pre h malé oproti $2l$

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{4\pi l} \left(\ln \left(\frac{2l}{a} \right) + \ln \left(\frac{l}{h} \right) \right). \quad (2.32)$$

Tento vzťah je možné ďalej rozpísať

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{2l}{a} \right) \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\ln \left(\frac{l}{h} \right)}{\ln \left(\frac{2l}{a} \right)} \right) = R' \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\ln \left(\frac{l}{h} \right)}{\ln \left(\frac{2l}{a} \right)} \right). \quad (2.33)$$

Tab. 2.1: Odpor podlhovastého zemniča uloženého vodorovne v zemi [5, s. 681]

	$R \cdot 2l$ [Ωm]	
$2l[\text{m}]$	$h = 1 \text{ m}$	$h = 0,25 \text{ m}$
10	$1,35 \rho$	$1,57 \rho$
20	1,57	1,79
50	1,87	2,08
100	2,08	2,3

Odpor R' vyjadruje odpor vodiča na povrchu. Druhý činiteľ vyjadruje pokles odporu s hĺbkou.

Porovnajme nasledujúci výpočet s príkladom vyššie 2.1. Nech sa $h = 0,6 \text{ m}$, potom sa výsledný odpor rovná,

$$R = 8,5 \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\ln\left(\frac{15}{0,6}\right)}{\ln\left(\frac{30}{0,01}\right)} \right) = 8,5 \cdot 0,7 \doteq 6 \quad \Omega.$$

Tento odpor je o 30% menší ako v predchádzajúcom príklade.

Zavedieme novú veličinu **prúd vytekajúci z jedného metra**.

$$i = \frac{I}{2l} \quad [\text{Am}^{-1}; \text{A}, \text{m}] \quad (2.34)$$

Pomocou tejto veličiny môže byť vzťah 2.32 prepísaný do tvaru

$$R \cdot 2l = \frac{U_0}{i} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{2l}{a}\right) + \ln\left(\frac{l}{h}\right) \right). \quad (2.35)$$

V tabulke 2.1 sú používané hĺbky, používané dĺžky a z nich vypočítané zemné odpory na meter zemniča. Pre zistenie vyvolaného potenciálu stačí vynásobiť odpory zemnou rezistivitou ρ .

Keďže sa činiteľ pri ρ veľmi nemení pri používaných dĺžkach vodičov a hĺbke v zemi, môžeme ho považovať za konštantu. Vďaka tomu môžeme vytvoriť jednoduchý vzťah

$$R \doteq 2 \frac{\rho}{l} \quad [\Omega; \Omega\text{m}, \text{m}]. \quad (2.36)$$

Konštanta je číslo 2 a l je v tomto prípade celá dĺžka pásu. Nasledujúci výpočet je pre porovnanie s príkladom vyššie.

$$R \doteq 2 \frac{\rho}{l} = 2 \cdot \frac{100}{30} = 6,7 \quad \Omega$$

Pre výpočet potenciálu v smere $0x$ medzi zemničom a bodom na povrchu zeme sa bude $x = 1 \text{ m}$ a bude použitý prúd i podľa rovnice 2.34. Ďalej bude použitá rovnica pre krokové napätie v smere x 2.38.

$$(U_{k,max})_{x0} = \frac{\rho I}{2\pi l} \left(\ln\left(\frac{2l}{a}\right) - \ln\left(\frac{2l}{s}\right) \right) \quad (2.37)$$

Potenciál medzi zemničom a bodom na povrchu je

$$(U_{k,max})_{x0} = \frac{\rho i}{\pi} \left(\ln \left(\frac{2l}{a} \right) - \ln(2l) \right) = \frac{\rho i}{\pi} \ln \left(\frac{1}{a} \right) \quad (2.38)$$

Pre pásy s náhradným polomerom $a = 1\text{cm}$ sa $\ln \left(\frac{1}{0,01} \right) = 4,6$ a vzniká jednoduchý vzťah,

$$(U_{k,max})_{x0} \doteq 1,5 \rho i \quad [\Omega; \Omega\text{m}, \text{Am}^{-1}]. \quad (2.39)$$

Je vidieť, že krokové napätie je úmerné súčinu rezistivity pôdy ρ a prúdu vytekajúceho z jedného metra i . Týmto vzorcom vypočítame krokové napätie pre uvažovaný pás s dĺžkou $2l = 30\text{ m}$, $\rho = 100\ \Omega\text{m}$, $I = 100\ \text{A}$ a $i = \frac{100}{30} = 3,34\ \text{Am}^{-1}$,

$$(U_{k,max})_{x0} = 1,5 \cdot 100 \cdot 3,34 \doteq 500\ \text{V}$$

”Ak považujeme rovinu symetrie preloženú osou x za povrch zeme, predstavuje jedna polovica priestoru pôdy so zarazenou tyčou dĺžky l a druhá zrkadlový obraz.” Potenciál na povrchu potom bude podľa rovnice

$$V = V_{x0} = \frac{\rho I}{4\pi l} \ln \left(\frac{l + \sqrt{x^2 + l^2}}{-l + \sqrt{x^2 + l^2}} \right) = \frac{\rho I}{2\pi l} \ln \left(\frac{2l}{x} \right) \quad [\text{V}; \Omega\text{m}, \text{A}, \text{m}]. \quad (2.40)$$

Je vidieť, že potenciál závisí na rezistivite pôdy ρ , vytekajúcom prúde I , vzdialenosti x a dĺžke vodiča l . Pribeh je rovnaký ako pre vodorovný vodič v smere $0x$. Pre veľké vzdialenosti môžeme povedať, že sa člen $\ln(2l/x)$ rovná l/x . V tom prípade platí, že potenciál pre veľmi vzdialené body je

$$V_{\infty} = \frac{\rho I}{2\pi x}. \quad (2.41)$$

Tento vzťah je rovnaký ako pre polguľu.

Zemný odpor tyčovej elektródy je podľa rovnice 2.21

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{2l}{a} \right) \quad [\Omega; \Omega\text{m}, \text{m}]. \quad (2.42)$$

Na základe tejto rovnice sa dá povedať, že na veľkosť odporu má podstatný vplyv dĺžka tyče l . Priemer tyče a na druhej strane nevlýva podstatne na hodnotu odporu.

Majme trúbku s priemerom $a=2\text{ cm}$ a dĺžkou $l=4\text{ m}$ uloženú zvislo. Rezistivitu pôdy uvažujme $\rho = 100\ \Omega\text{m}$. Odpor takéhoto zemniča je

$$R = \frac{100}{2\pi 4} \ln \left(\frac{2 \cdot 4}{0,02} \right) = 24 \quad [\Omega].$$

Rovnaký odpor by mal aj guľový zemnič s polomerom $a = 0,67\text{ m}$. Jeho povrch by bol 6x väčší.

Pre tyč uloženú v zemi môžeme počítať potenciál na povrchu zeme v bode x ako

$$E = -\frac{dV}{dx} = \frac{\rho}{2\pi x} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + l^2}} \quad [\text{Vm}^{-1}; \Omega\text{m}, \text{A}, \text{m}]. \quad (2.43)$$

Pre rastúcu vzdialenosť x sa bude intenzita znižovať. Pre veľké hodnoty x môžeme upraviť člen $1/\sqrt{x^2 + l^2}$ na $1/x$. Takto sa bude intenzita vo veľkej vzdialenosti rovnáť

$$E_\infty = \frac{\rho I}{2\pi x^2}. \quad (2.44)$$

Je to opäť rovnaké ako pre polguľu. V opačnom prípade pre malé vzdialenosti x sa člen $1/\sqrt{x^2 + l^2}$ upraví na $1/x$. Intenzita sa pre tento prípad rovná

$$E_0 = \frac{\rho I}{2\pi xl}. \quad (2.45)$$

Táto intenzita je oproti guli oveľa väčšia. Je to spôsobené prúdovou koncentráciou na povrchu vodiča.

Maximálne krokové napätie sa vypočíta podľa rovníc 2.38 a 2.37. Tyčou z predchádzajúceho príkladu preteká prúd $I=100$ A .

$$U_{k,max} = \frac{100 \cdot 100}{2\pi 4} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot 4}{0,02} \right) - \ln \left(\frac{2 \cdot 4}{1} \right) \right) = 1750 \quad \text{V}.$$

Ak použijeme 2.42 je $1570/(24 \cdot 100) = 0,66 \rightarrow 66\%$ napätia proti zemi U_0 .

Použitím zavedenej veličiny prúd na jednotku dĺžky tyče i dostaneme

$$R \cdot l = \frac{U_0}{i} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{2l}{a} \right) \quad [\Omega; \text{m}; \text{V}, \text{Am}^{-1}; \Omega\text{m}, \text{m}]. \quad (2.46)$$

Pre rôzne rozmery elektród sa hodnota logaritmu mení málo. Dokonca pre bežne používané rúrky a tyče môžeme povedať, že sa rovná konštante 5,5. Touto úvahou dôjdeme k zjednodušeniu

$$Rl = \frac{U_0}{i} = 0,9\rho. \quad (2.47)$$

Zjednodušenie zemného odporu tyče

$$R = 0,9 \frac{\rho}{l} \quad [\Omega, \Omega\text{m}, \text{m}]. \quad (2.48)$$

Zjednodušenie napätia tyče proti zemi

$$U_0 = 0,9\rho i \quad [\text{V}; \Omega\text{m}, \text{Am}^{-1}]. \quad (2.49)$$

Maximálne krokové napätie pre krok 1 m

$$U_{k,max} = \frac{\rho i}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{a} \right). \quad (2.50)$$

Pre bežne používané priemery tyčí je $\ln(1/a) \doteq 4$, čiže

$$U_{k,max} = 0,64\rho i. \quad (2.51)$$

2.2 Prstencový (obvodový zemnič)

Tieto zemniče sa používa okolo objektov. Možnosť ich využitia je okolo budov, stožiarov alebo rozvodní.

Pre analýzu sa urobí náhrada, kedy sa uvažuje vodič kruhového prierezu s polomerom a položeným vodorovne v kruhu s polomerom r_0 . Polovica prierezu je v zemi podľa obrázka 2.4. Na obrázku je spodná časť zemničom a horná je zrkadlovým obrazom.

Pre popis zavedieme valcové súradnice z , r , ϑ . Zemný prúd bude I . Celý prúd vytekajúci zo zemniča a zrkadlového obrazu je teda $2I$. Elementom tohto zemniča vyteká do zeme prúd

$$d(2I) = \frac{2I}{2\pi} d\vartheta. \quad (2.52)$$

Element takého zemniča je bodový zdroj a . Prúd z neho vytekajúci vytvára v bode P potenciál

$$dV = \frac{1}{\xi} \frac{\rho}{4\pi} d(2I). \quad (2.53)$$

V tomto bode je možné vypočítať súčtový potenciál od všetkých elementov prstenca pomocou integrálu ako

$$V = \int_0^{2\pi} \frac{1}{\xi} \frac{\rho}{4\pi} d(2I) = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\xi} d\vartheta = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\vartheta}{\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\vartheta) + z^2}}. \quad (2.54)$$

Zavedením substitúcie, kde sa $\vartheta = \pi - 2\eta$, $\eta = (\pi/2) - (\vartheta/2)$, $d\vartheta = -2d\eta$ je možné napísať

$$V = \frac{\rho I}{\pi} \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{d\eta}{\sqrt{(r+r_0)^2 - 4r_0r \sin^2(\eta) + z^2}} = \frac{\rho I}{\pi} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{(r+r_0)^2 + z^2}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\eta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2(\eta)}}. \quad (2.55)$$

V tejto rovnici sa člen k rovná

$$k = \sqrt{\frac{4rr_0}{(r+r_0)^2 + z^2}}.$$

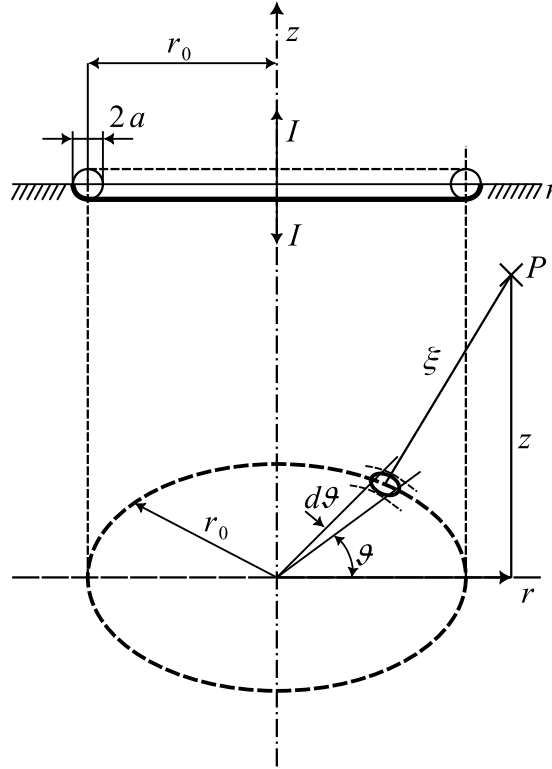
V prípade, že sa $z = 0$ a to platí pre prípady na povrchu zeme, sa $k = (2\sqrt{rr_0})/(r+r_0)$. V bode na povrchu zeme je potenciál vzdialený r od stredu kruhového zemniča

$$V = \frac{\rho I}{\pi^2} \frac{1}{r+r_0} \cdot F(k) \quad (2.56)$$

a

$$F(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\eta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2(\eta)}}$$

je úplný eliptický integrál prvého druhu. Uvažujeme, že $a \ll r_0$. Potom podľa tejto



Obr. 2.4: Prstencový zemnič, prekreslené z [5, s. 685]

úvahy, a že $r = r_0 + a$ môžeme napísať rozvoj

$$k^2 = \frac{4(r_0 + a)r_0}{(2r_0 + a)^2} = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{a}{r_0} \right)^2. \quad (2.57)$$

V prípade, že sa k blíži jednej, môžeme nahradiť funkciu $F(k) = \ln(4/\sqrt{1-k^2})$. Následne pomocou rozvoja pre k je $F(k) = \ln(8r_0/a)$. Dosadením do 2.56 dostaneme potenciál zemniča, a teda napätie proti zemi

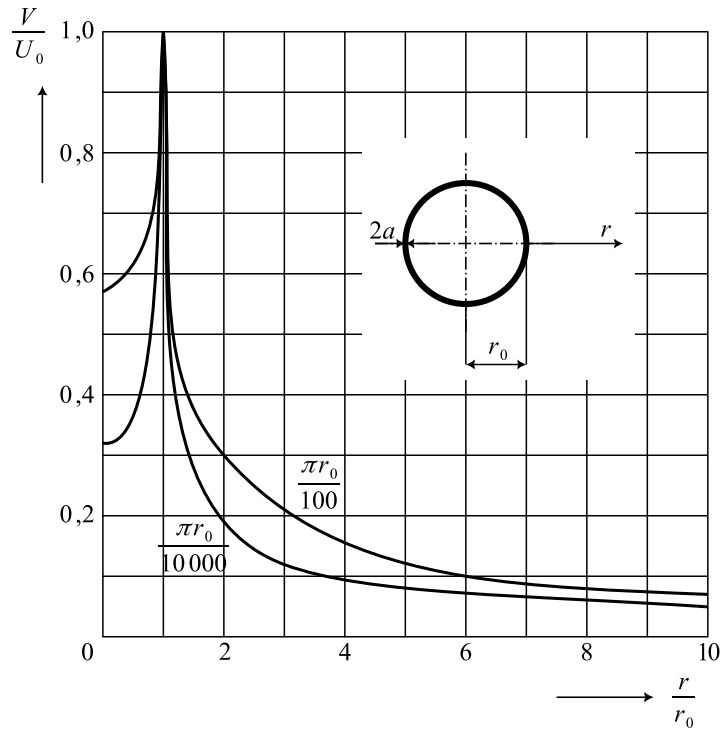
$$U_0 = \frac{\rho I}{2\pi^2 r_0} \ln \left(\frac{8r_0}{a} \right) \quad [V; \Omega m, A, m]. \quad (2.58)$$

Pomocou vzťahou 2.56 a 2.58 vychádza

$$\frac{V}{U_0} = \frac{2r_0}{(r + r_0) \ln(8r_0/a)} F(k). \quad (2.59)$$

Grafickú závislosť potenciálu pre $\pi r_0/a = 100$ a 10000 je možné vidieť na obrázku 2.5. Výsledkom úvahy $r = 0$ ($k = 0, F(k) = \pi/2$) je dôležitý vzťah

$$\frac{V_s}{U_0} = \frac{\pi}{\ln(8r_0/a)}. \quad (2.60)$$



Obr. 2.5: Priebek potenciálu prstencového zemniča, prekreslené z [5, s. 687]

Týmto vzťahom vyjadrujeme pomer potenciálu zeme uprostred obvodu a napätia na zemniči. Využijeme tento vzťah pre prípad $r_0 = 3$ m a $a = 1$ cm. Výsledkom je

$$\frac{V_s}{U_0} = \frac{\pi}{\ln(8 \cdot 3/0,01)} \doteq 0,4.$$

Výsledok 0,4 hovorí o tom, že potenciál na povrchu je uprostred prstenca 40% napätia zemniča. Kvôli tejto vlastnosti je tento typ zemniča vhodný na zemnenie objektov, pri ktorých je zaručené malé dotykové a krokové napätie vo vnútri obvodu.

Zemný odpor je vypočítaný pomocou 2.58

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi^2 r_0} \ln\left(\frac{8r_0}{a}\right) \quad [\Omega; V; A; \Omega m, m]. \quad (2.61)$$

Rezistivita pôdy $\rho = 100 \Omega m$ a rozmery uvažujeme z príkladu vyššie. Odpor tohto kruhového zemniča je

$$R = 100/(2\pi^2 \cdot 3) \ln(8 \cdot 3/0,01) \doteq 13,5 \quad \Omega.$$

Rovnako dlhý vodič uložený v priamke má zemný odpor podľa 2.22 12,8 Ω . Rozdiely v odporoch sú spôsobené tým, že prúdová hustota je nerovnomerne rozložená v kruhu a mimo kruhu. Všeobecne by sa dalo povedať, že vodič v priamke a rovnako dlhý vodič v kruhu sú v pomere $\ln(l/a)/\ln(1,25l/a)$. Tento pomer je skoro rovný

jednej. Týmto zjednodušením dospejeme pomocou 2.36 k výpočtu zemného odporu obvodového zemniča.

Maximálne krokové napätie môžeme vypočítať tak, že dĺžka kroku s je malá proti r_0 a $a \ll s$

$$U_{k,max} = V_{x-s/2} - V_{x+s/2} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{2r_0} \ln \left(\frac{8r_0}{a} \right) - \frac{1}{2r_0 + s} \ln \left(\frac{8r_0}{s} \right) \right) \doteq \frac{\rho I}{2\pi^2 r_0} \ln \left(\frac{s}{a} \right). \quad (2.62)$$

Pásový obvodový zemnič nahradíme polomerom $a = 1$ cm a polomer obvodu $r_0 = 15$ m. Obvodom preteká prúd $I = 100$ A. Krokové napätie pre krok $s = 1$ m je

$$U_{k,max} = \frac{100 \cdot 100}{2\pi^2 \cdot 15} \ln \left(\frac{1}{0,01} \right) = 155 \text{ V}.$$

Podľa 2.61 zemný odpor tohto zemniča je

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{100}{2\pi^2 \cdot 15} \ln \left(\frac{8 \cdot 15}{0,01} \right) = 3,18 \text{ } \Omega$$

a napätie na zemniči pri 100 A ... $U_0 = 3,18 \cdot 100 = 318$ V ; $U_{k,max}/U_0 \doteq 0,49$. V strede kruhu je potenciál na povrchu zeme podľa 2.58 a 2.56

$$V_s = \frac{\rho I}{2\pi r_0}. \quad (2.63)$$

Využijeme zavedenú veličinu prúd vytekajúci z jedného metra i a potom môžeme potenciál v rovnici 2.63 prepísať na

$$V_s = \rho i \quad [\text{V}; \Omega\text{m}, \text{A/m}], \quad (2.64)$$

lebo $l = 2\pi r_0$.

Záverom je, že potenciál v strede kruhu je súčinom merného odporu pôdy a prúdu vytekajúceho z jedného metra zemniča.

2.3 Dosková elektróda

Dávnejšie často používaný typ zemniča. Za doskový zemnič sa považuje geometrický útvar, ktorý ma dĺžku a šírku oveľa väčšiu ako hrúbku.

Pre odvodenia sú opäť zavedené zjednodušenia. Uvažujeme kruhovú dosku v neobmedzenom kruhovom prostredí. Priamkový prúdový zdroj má ekvipotenciálne plochy v tvare rotačných elipsoidov. Ohniská je možné umiestniť na konce takéhoto zdroja. Tým, že sa os y znižuje, pozdĺžny elipsoid prechádza do tvaru plochého. Takýmto elipsoidom nahradíme doskový kruhový zemnič. Os y označíme ako $2b$.

Ohnisková vzdialenosť elipsy vyjadríme poloosami

$$l = \sqrt{b^2 - a^2}. \quad (2.65)$$

Potenciál dostaneme pomocou dosadenia do rovnice 2.17

$$V = \frac{\rho}{8\pi\sqrt{b^2 - a^2}} 2I \ln \left(\frac{y + \sqrt{b^2 - a^2} + \sqrt{x^2 + (y + \sqrt{b^2 - a^2})^2}}{y - \sqrt{b^2 - a^2} + \sqrt{x^2 + (y - \sqrt{b^2 - a^2})^2}} \right). \quad (2.66)$$

Predpokladom $b = 0$ dostaneme výraz, v ktorom $\sqrt{-1}$ nahradíme za j , a teda

$$V = \frac{\rho}{8\pi ja} 2I \ln \left(\frac{y + ja + \sqrt{x^2 + (y + ja)^2}}{y - ja + \sqrt{x^2 + (y - ja)^2}} \right). \quad (2.67)$$

Tento potenciál je popísaný všeobecne v ľubovoľnom bode so súradnicami (x, y) . Podmienkou je, aby hrúbka dosky bola veľmi malá oproti polomeru a .

V rovine, keď $y = 0$, potenciál bodu je

$$V = \frac{\rho}{8\pi ja} 2I \ln \left(\frac{ja + \sqrt{x^2 + a^2}}{-ja + \sqrt{x^2 + a^2}} \right) = \frac{\rho}{4\pi a} 2I \arcsin \left(\frac{a}{x} \right). \quad (2.68)$$

Napätie zemniča proti zemi dostaneme tým, že dosadíme za x polomer zemniča a

$$U_0 = \frac{\rho}{8a} (2I). \quad (2.69)$$

Zemný odpor kruhového doskového zemniča je $U_0/2I = \rho/8a$. Na povrchu má tento zemnič odpor

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{4a} \quad [\Omega; \Omega\text{m}, \text{m}]. \quad (2.70)$$

Odpor je priamo úmerný rezistivite pôdy a klesá úmerne s rastúcim polomerom dosky. Potenciál miesta na povrchu je vyjadrený z 2.68 a 2.69

$$V = U_0 \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{a}{x} \right). \quad (2.71)$$

Priebeh potenciálu v tvare $V/U_0 = f(x/a)$ je na obrázku 2.6. Krokové napätie podľa 2.68

$$U_k = V_{x-s/2} - V_{x+s/2} = \frac{\rho I}{2\pi a} \left(\arcsin \left(\frac{a}{x - s/2} \right) - \arcsin \left(\frac{a}{x + s/2} \right) \right). \quad (2.72)$$

Maximálne krokové napätie je na okraji zemniča ($x = a + s/2$)

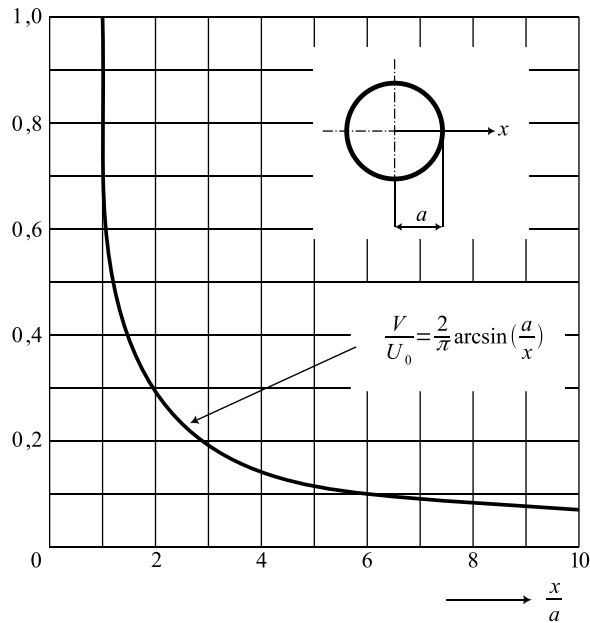
$$U_{k,max} = \frac{\rho I}{2\pi a} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{a}{a + s} \right) \right). \quad (2.73)$$

Pre uvažovanú dĺžku kroku $s = 1 \text{ m}$

$$U_{k,max} = \frac{\rho I}{2\pi a} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{a}{a + 1} \right) \right) \quad (2.74)$$

a pomer maximálneho krokového napätia k napätiu zemniča

$$\frac{U_{k,max}}{U_0} = 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{a}{a + 1} \right). \quad (2.75)$$



Obr. 2.6: Priebeh potenciálu kruhovej dosky, prekreslené z [5, s. 689]

Intenzita poľa pozdĺž povrchu doskového zemniča

$$E_a = \frac{\rho I}{2\pi a} \frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2}}. \quad (2.76)$$

Rozloženie hustoty zemného prúdu

$$J = \frac{E_a}{\rho} = \frac{I}{2\pi a} \frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2}} \quad [\text{A/m}^2; \text{V/m}, \Omega\text{m}; \text{A}, \text{m}]. \quad (2.77)$$

Podľa tohto vzťahu vieme povedať, že hustota prúdu je nerovnomerne rozložená. Najväčšia je na okraji. Stredná prúdová hustota

$$J_{str} = \frac{I}{\pi a^2}. \quad (2.78)$$

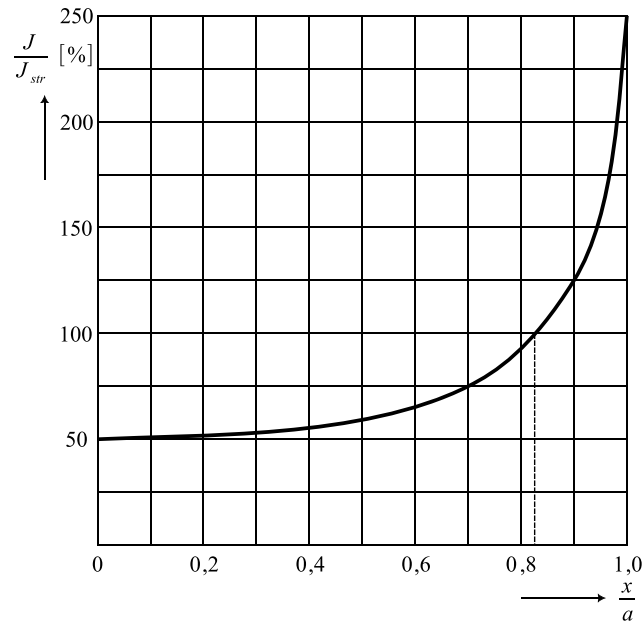
Pomer prúdových hustôt

$$\frac{J}{J_{str}} = \frac{a}{2\sqrt{a^2 - x^2}} \quad (2.79)$$

je zobrazený graficky na obrázku 2.7. Tento obrázok dokazuje, že okraj zemniča je niekoľkonásobne viac zatažený ako stred. Z tohto dôvodu sú doskové zemniče nehospodárne.

Potenciál doskového zemniča v hĺbke h sa opäť odvodí pomocou zrkadlového obrazu 2.8. Vlastný potenciál dosky, ktorou preteká prúd I je

$$V = \frac{\rho I}{4\pi a} \frac{\pi}{2}. \quad (2.80)$$



Obr. 2.7: Rozloženie hustoty zemného prúdu na kruhovej doske, prekreslené z [5, s. 691]

Potenciál od zrkadlového obrazu ($x = 0; y = 2h$) je podľa 2.67

$$V' = \frac{\rho I}{8\pi j a} \ln \left(\frac{2h + ja}{2h - ja} \right) = \frac{\rho I}{8\pi a} \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{a}{\sqrt{(2h)^2 + a^2}} \right). \quad (2.81)$$

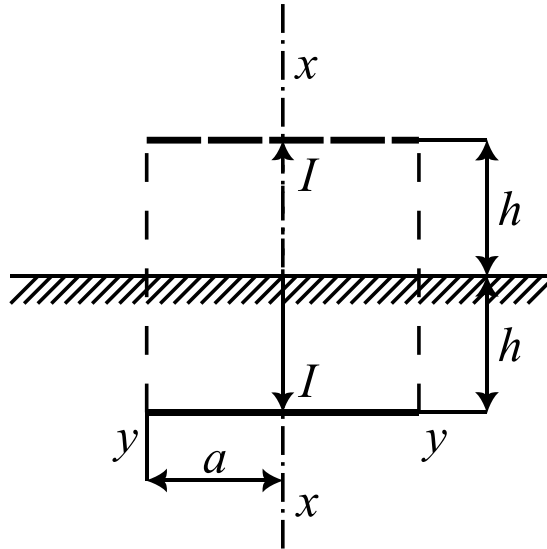
Vďaka súčtu týchto dvoch potenciálov dostaneme potenciál dosky (napätie proti zemi)

$$\begin{aligned} U_0 = V + V' &= \frac{\rho I}{4\pi a} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{a}{\sqrt{(2h)^2 + a^2}} \right) \right) \\ &= \frac{\rho I}{4a} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{a}{\sqrt{(2h)^2 + a^2}} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.82)$$

Z tohto vzťahu vieme vyjadriť odpor dosky v hĺbke h

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{4a} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{a}{\sqrt{(2h)^2 + a^2}} \right) \right) \quad [\Omega; V, A; \Omega, m]. \quad (2.83)$$

Táto rovnica je platná aj pre dosku umiestnenú zvislo. Do zeme sa dosky ukladajú tak, aby bola horná hrana 0,5 m až 1 m hlboko. Ak je hĺbka dostatočne veľká oproti polomeru dosky, je možné dosiahnuť až 50 %-né zníženie odporu.



Obr. 2.8: Kruhová doska v hĺbke h , prekreslené z [5, s. 691]

2.4 Lúčový zemnič

Tento typ zemniča má využitie na zemnenie vonkajších stožiarov vedení vysokého napätia v menej vodivých pôdach. Ako taký zemnič vyzerá, je na obrázku 2.9. Pomyslene rozdelíme lúče na dva kolmé vodiče s dĺžkou $2l$, cez ktoré preteká prúd $2I$ a ich priemer je $2a$. Vlastný potenciál je podľa 2.20

$$V = \frac{\rho I}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \quad [\text{V}; \Omega\text{m}, \text{A}, \text{m}]. \quad (2.84)$$

Potenciál tohto vodiča sa zväčší o potenciál od druhého križujúceho vodiča. Potenciál druhého vodiča je

$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{x}\right). \quad (2.85)$$

Stredná hodnota logaritmu $2l/x$ po dĺžke vodiča l

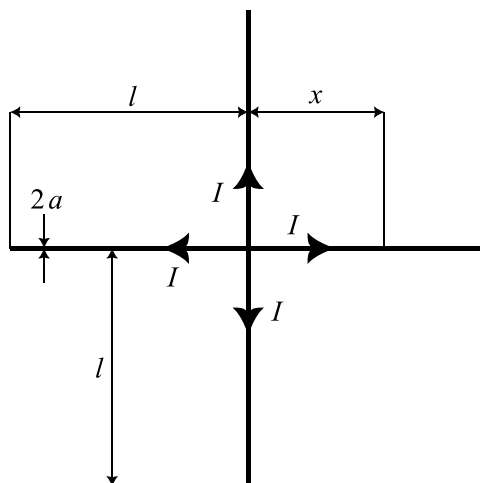
$$\begin{aligned} \frac{1}{l} \int_0^l \ln\left(\frac{2l}{x}\right) dx &= -2 \int_\infty^2 \ln(\beta) d\left(\frac{1}{\beta}\right) = -2 \int_\infty^2 \frac{\ln(\beta)}{\beta^2} d\beta \\ &= 2 \left[\frac{\ln(\beta)}{\beta} + \frac{1}{\beta} \right]_\infty^2 = \ln(2) + 1. \end{aligned} \quad (2.86)$$

Prírastok potenciálu križujúceho vodič je

$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi l} (\ln(2) + 1). \quad (2.87)$$

Celkový potenciál, ktorý je rovný napätiu zemniča proti zemi je súčtom 2.84 a 2.4

$$U_0 = V + V_1 = \frac{\rho I}{2\pi l} \left(\frac{2l}{a} + \ln(2) + 1 \right). \quad (2.88)$$



Obr. 2.9: Lúčový zemnič, prekreslené z [5, s. 692]

Odpor pre štyri lúče

$$R = \frac{U_0}{4I} \doteq \frac{\rho}{8\pi l}. \quad (2.89)$$

V prípade, že sa zemnič nachádza blízko povrchu, je jeho zemný odpor dvakrát väčší

$$R' = \frac{\rho}{4\pi l}. \quad [\Omega; \Omega_m, m]. \quad (2.90)$$

Pokles odporu nie je úmerný množstvu pridaných tyčí. Ak by sa nám podarilo vytvoriť lúčový zemnič z veľkého množstva lúčov, dostaneme sa k odporu

$$R = \frac{\rho}{4l}. \quad (2.91)$$

Pri zväčšovaní lúčov do nekonečna sa odpor zmenší len na

$$\frac{\pi}{\ln(4l/a) + 1} \doteq \frac{1}{3}, \quad (2.92)$$

čiže jednu tretinu odporu zemniča so štyrmi lúčmi. Z toho plynie záver, že nadmerné zvyšovanie počtu lúčov je nevhodné.

2.5 Sústava tyčových elektród

V takýchto sústavách uvažujeme, že sú tyče pospájané paralelne. V prípade, že by sme uvažovali veľké rozostupy medzi jednotlivými elektródami, elektródy by sa vzájomne neovplyvňovali. Celkový odpor by sa vypočítal ako

$$R = \frac{R_0}{n}, \quad (2.93)$$

kde R_0 je odpor jednej elektródy a n je ich počet. V praxi sa elektródy umiestňujú blízko seba a teda vzájomné pôsobenie sa medzi nimi vyskytuje. Výsledkom je nárast odporu z dôvodu zmenšeného prierezu zeme.

Pri tomto type zemníča sa uvádza stupeň využitia elektród η . Je definovaný za predpokladu, že odpor elektródy je R_0 , elektródy sú natoľko vzdialené, že sa ich polia neovplyvňujú R_∞ a skutočný odpor sústavy, ktorý by mal byť pre konečné vzdialenosti medzi elektródami R , teda

$$\eta = \frac{R_\infty}{R}. \quad (2.94)$$

Za predpokladu, že všetky elektródy majú rovnaký odpor, môžeme povedať

$$R_\infty = \frac{R_0}{n}, \quad (2.95)$$

$$\eta = \frac{R_0}{n \cdot R}, \quad (2.96)$$

kde n je počet elektród.

Potenciál elektródy je daný vlastným potenciálom a potenciálom od ostatných elektród. Vlastný potenciál tyče s označením l je

$$V'_l = I_l R_l \quad [\text{V} ; \text{A} , \Omega]. \quad (2.97)$$

Elektróda s označením k vytvorí na elektróde l potenciál

$$V_{lk} = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{a_{kl}} \quad [\text{V} ; \Omega\text{m}, \text{A} , \text{m}], \quad (2.98)$$

kde a_{kl} je stredná vzdialenosť medzi elektródami. Vyvolaný potenciál ostatnými elektródami na elektróde l bude

$$V_l = \sum \left(\frac{\rho I_k}{2\pi} \cdot \frac{1}{a_{kl}} \right). \quad (2.99)$$

Výsledný potenciál bude pre elektródu l súčtom vlastného potenciálu a sumou potenciálu od elektród

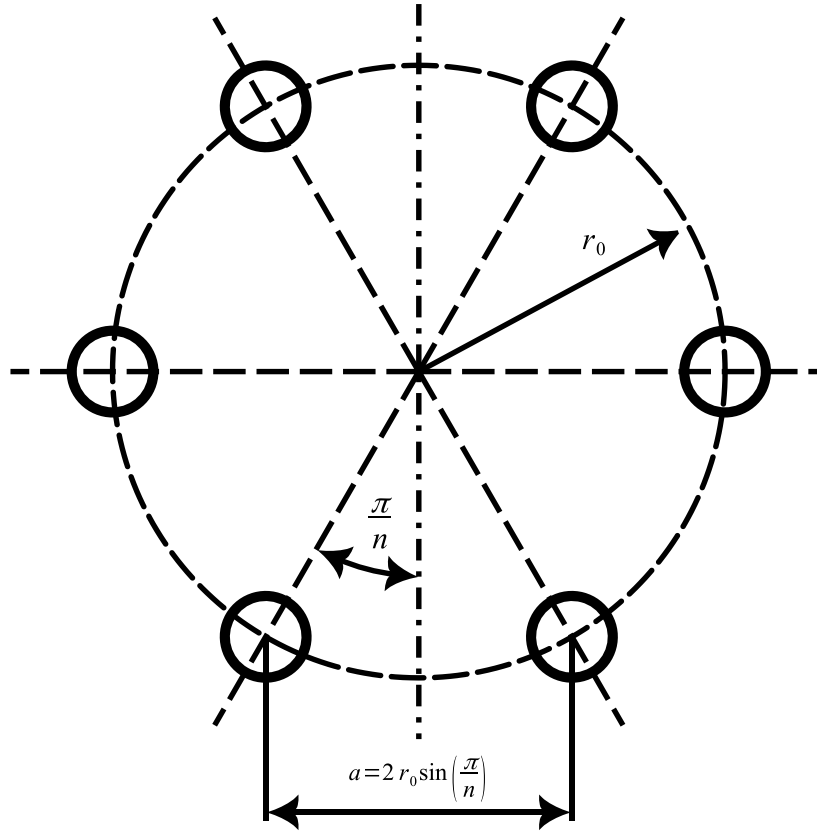
$$V_{l0} = V'_l + V_l = I_l R_l + \sum \left(\frac{\rho I_k}{2\pi} \cdot \frac{1}{a_{kl}} \right). \quad (2.100)$$

Symetricky rozloženými elektródami napríklad v kruhu 2.10 s polomerom r_0 preteká prúd

$$I_1 = \frac{I}{n}, \quad (2.101)$$

kde n je počet elektród a I je celkový prúd v sústave. Vzdialenosť medzi elektródami je

$$a_{kl} = 2r_0 \sin \left(\frac{\pi}{n} \cdot (k - l) \right). \quad (2.102)$$



Obr. 2.10: Sústava tyčí, prekreslené z [5, s. 694]

Z rovníc 2.97 a 2.102 dostávame potenciál elektródy

$$V_{l0} = U_0 = \frac{I}{n} \left(R_0 + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{2r_0 \sin\left(\frac{\pi}{n} \cdot k\right)} \right). \quad (2.103)$$

Výsledný odpor pre sústavu tyčových elektród je

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{R_0}{n} + \frac{\rho}{2\pi \cdot 2r_0} \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{n} \cdot k\right)} = R_\infty \left(1 + \frac{\rho}{2\pi \cdot 2r_0 \cdot R_\infty} \cdot f(n) \right), \quad (2.104)$$

kde

$$f(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{n} \cdot k\right)}. \quad (2.105)$$

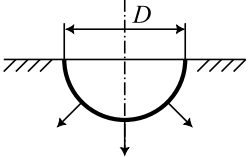
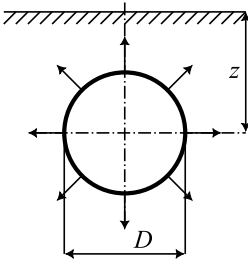
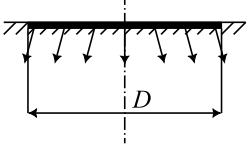
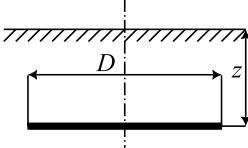
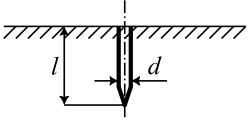
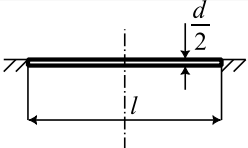
Činiteľ využitia sústavy z 2.94 je možné upraviť na

$$\eta = \frac{R_\infty}{R} = \frac{1}{1 + [\rho/(2\pi \cdot 2r_0 \cdot R_\infty)]f(n)}. \quad (2.106)$$

2.6 Prehľad odvodených vzťahov pre zemniče

Obrázky sú prevzaté z literatúry [5, s. 706-708]. Tabuľky sú taktiež inšpirované touto literatúrou.

Tab. 2.2: Prehľad odvodených vzťahov I.

Typ zemniča	Uloženie	Zemný odpor [Ω] (exaktný vzorec)
polgula priemer D		$R = \frac{\rho}{\pi D}$
gula v zemi priemer D hĺbka z		$R = \frac{\rho}{2\pi D} \left(1 + \frac{D}{4z}\right)$ podmienka: $z > \frac{D}{2}$
kruhovú doska na povrchu zeme priemer D		$R = \frac{\rho}{2D}$
kruhovú doska v zemi priemer D hĺbka z		$R = \frac{\rho}{2D} \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{D}{2 \cdot \sqrt{(2z)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}} \right) \right]$
tyč (rúrka) dĺžka l priemer d		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{4l}{d} \right)$ podmienka: $l \gg \frac{d}{2}$
pozdĺžny vodič dĺžka l priemer d		$R = \frac{\rho}{\pi l} \ln \left(\frac{2l}{d} \right)$ podmienka: $l \gg d$

Tab. 2.3: Prehľad odvodených vzťahov II.

Typ zemniča	Uloženie	Zemný odpor $[\Omega]$ (exaktný vzorec)
pozdĺžny vodič v zemi dĺžka l priemer d hĺbka z		$R = \frac{\rho}{\pi l} \frac{1}{2} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{l}{2z} \right) \right)$ podmienka: $l \gg d \wedge z \ll \frac{l}{4}$
vodič v kruhu priemer vodiča d priemer kruhu D		$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \left(\frac{8D}{d} \right)$ podmienka: $D \gg d$
vodič v kruhu v zemi; priemer vodiča d priemer kruhu D hĺbka z		$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \frac{1}{2} \left(\ln \left(\frac{8D}{d} \right) + \ln \left(\frac{\pi D}{2z} \right) \right)$ podmienka: $D \gg d \wedge z \ll \frac{D}{2}$
lúčová hviezda dĺžka lúča l priemer vodiča d počet lúčov $n = 4$		$R = \frac{\rho}{4\pi l} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + 1 \right)$ podmienka: $l \gg d$
mrežová sieť priemer D celková dĺžka vodičov l		$R = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{l}$ poznámka: Zjednodušený vzťah !
tyče (rúrka) v obvode; priemer obvodu D počet tyčí n odpor jednej tyče R_0		$R = \frac{R_0}{n} + \frac{\rho}{2\pi D} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{\sin \left(\frac{\pi \cdot k}{n} \right)}$ podmienka: $D \gg d \wedge l \gg d$

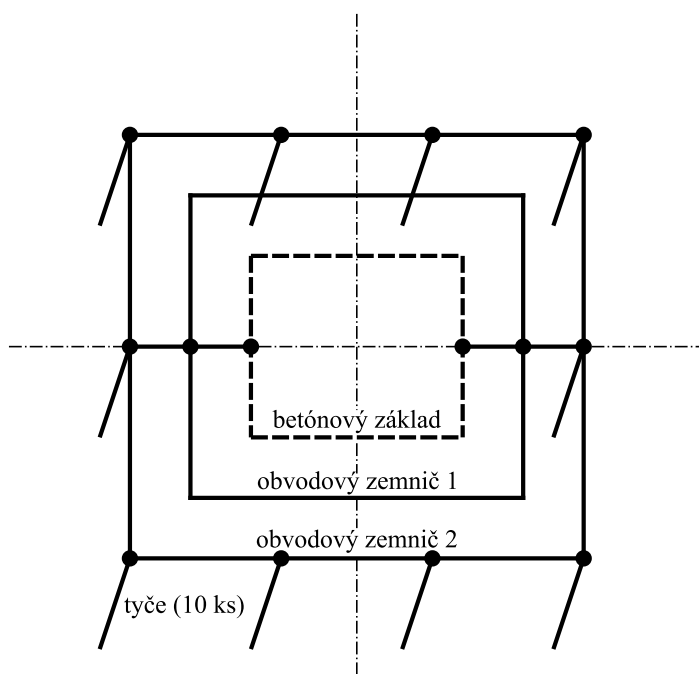
3 Príklad výpočtu a overenie výsledkov

V tejto časti sa nachádza manuálny výpočet zvolenej sústavy na obrázku 3.1. Táto sústava poslúži na overenie programových výsledkov. Ide o program popísaný v kapitole 4. Spomínaný program je výsledkom tejto bakalárskej práce. Programové výsledky je možné vidieť na obrázkoch v druhej časti tejto kapitoly 3.2. Na obrázkoch je zároveň možné vidieť aj dizajn programu. Prehľad číselných výsledkov odporu pre zvolenú sústavu je možné vidieť na konci kapitoly v tabuľke 3.1.

3.1 Manuálny výpočet celkového odporu sústavy

Sústava na obrázku 3.1 je vypočítaná na základe podnikových noriem [3], [2] a [1]. Podľa vzťahov, ktoré sa v týchto normách nachádzajú, počíta aj program popísaný v kapitole 4. Preto stanovíme výsledky manuálne, aby na konci mohlo nastať porovnanie.

Rozmery sústavy sú definované takto. Obvodový zemnič 1 má rozmery 5,5 x 5 m, je uložený v hĺbke 0,6 m a je zhotovený z materiálu 30 x 4 mm, kde šírka sa nahradí podľa normy priemerom 0,015 m. Obvodový zemnič 2 má rozmery 7,5 x 7 m, je uložený v hĺbke 0,8 m a je zhotovený z rovnakého materiálu. Tyče sú dlhé 1,5 m a sú zhotovené z materiálu s priemeru 0,03 m. Rezistivita pôdy bola stanovená na 100 Ω m.



Obr. 3.1: Zvolená sústava pre výpočet

3.1.1 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 5 [1]

Je potrebné vypočítať ekvivalentný priemer obvodových zemničív. Ekvivalentný priemer obvodového zemniča 1 sa vypočíta ako

$$D_{ekv1} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,5 \cdot 5}{\pi}} = 5,91 \text{ m} \quad (3.1)$$

a ekvivalentný priemer obvodového zemniča 2 ako

$$D_{ekv2} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7,5 \cdot 7}{\pi}} = 8,18 \text{ m.} \quad (3.2)$$

Následne je potrebné vypočítať odpory jednotlivo. Odpor obvodového zemniča 1 má hodnotu

$$\begin{aligned} R_{nek1} &= \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left[\ln \left(\frac{8D}{d} \right) + \ln \left(\frac{\pi D}{2z} \right) \right] \\ &= \frac{100}{2\pi^2 5,91} \left[\ln \left(\frac{8 \cdot 5,91}{0,015} \right) + \ln \left(\frac{\pi \cdot 5,91}{2 \cdot 0,6} \right) \right] \\ &= 9,25 \text{ } \Omega. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Odpor obvodového zemniča 2 má hodnotu

$$\begin{aligned} R_{nek2} &= \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left[\ln \left(\frac{8D}{d} \right) + \ln \left(\frac{\pi D}{2z} \right) \right] \\ &= \frac{100}{2\pi^2 \cdot 8,18} \left[\ln \left(\frac{8 \cdot 8,18}{0,015} \right) + \ln \left(\frac{\pi \cdot 8,18}{2 \cdot 0,8} \right) \right] \\ &= 6,91 \text{ } \Omega. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Odpor jednej tyče je

$$\begin{aligned} R_{tyč} &= \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} \right) \\ &= \frac{100}{2\pi \cdot 1,5} \ln \left(\frac{4 \cdot 1,5}{0,03} \right) \\ &= 56,22 \text{ } \Omega. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Pri tyčiach je následne potrebné vypočítať odpor sústavy tyčí. Ten sa vypočíta ako

$$R_{ts} = \frac{R_{tyč}}{n} \cdot \frac{1}{\eta_{tn}}. \quad (3.6)$$

Do tohto vzorca je potrebný člen η_{tn} . Ten sa určuje pomocou grafov. K jeho určeniu vypočítame parameter a/L . Keďže sa tyče nachádzajú na obvode zemniča 1, dosadíme za R polovicu D_{ekv2} . Uhol φ uvažujeme rovnaký, teda tyče sú rozmiestnené symetricky s rovnakým rozstupom po obvode fiktívneho kruhu.

$$a = R\sqrt{2 - 2\cos(\varphi)} \text{ [m]}. \quad (3.7)$$

Vydelením rovnice dĺžkou tyče L dostaneme spomínaný parameter

$$\begin{aligned}\frac{a}{L} &= \frac{D_{ekv2}}{2L} \sqrt{2 - 2 \cos(\varphi)}. \\ &= \frac{8,18}{2 \cdot 1,5} \sqrt{2 - 2 \cos\left(\frac{360}{10}\right)}. \\ &= 1,69 \quad [-].\end{aligned}\tag{3.8}$$

Podľa grafu v [1] bolo určené $\eta_{tn} = 0,7$. Teraz je možné dopočítať rovnicu 3.6.

$$R_{ts} = \frac{56,22}{10} \cdot \frac{1}{0,7} = 8,03 \quad \Omega.\tag{3.9}$$

V predposlednom kroku sa spoja oba obvodové zemniče.

$$R_{n12} = \frac{R_{nek1} \cdot R_{nek2}}{R_{nek1} + R_{nek2}} \cdot \frac{1}{\eta_{oo}} \quad [\Omega].\tag{3.10}$$

η_{oo} je stanovená podľa [1].

$$R_{n12} = \frac{9,25 \cdot 6,91}{9,25 + 6,91} \cdot \frac{1}{0,69} = 5,73 \quad \Omega.\tag{3.11}$$

V posledom kroku sa doplnia tyče. Člen η_{ot} je taktiež stanovený podľa [1].

$$R = \frac{R_{n12} \cdot R_{ts}}{R_{n12} + R_{ts}} \cdot \frac{1}{\eta_{ot}} = \frac{5,73 \cdot 8,03}{5,73 + 8,03} \cdot \frac{1}{0,66} = 5,07 \quad \Omega.\tag{3.12}$$

3.1.2 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 4 [2]

Podľa [2] je výpočet veľmi podobný. Rozdiel je v koeficientoch, ktoré definuje norma pre paralelné spájanie čiastkových zemničov. Rozdiel vo výsledkoch oproti [1] spôsobuje aj prepočet ekvivalentného priemeru. V prípadoch podľa [2] a [3] sa počíta na základe obvodu, nie obsahu zemniča. Výpočet bude nasledovný. Stanovíme D_{ekv1} a D_{ekv2} .

$$D_{ekv1} = \frac{2 \cdot (a + b)}{\pi} = \frac{2 \cdot (5,5 + 5)}{\pi} = 6,68 \quad \text{m}.\tag{3.13}$$

$$D_{ekv2} = \frac{2 \cdot (a + b)}{\pi} = \frac{2 \cdot (7,5 + 7)}{\pi} = 9,23 \quad \text{m}.\tag{3.14}$$

Následne je možné vypočítať odpory jednotlivých obvodových zemničov.

$$\begin{aligned}R_{nek1} &= \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left[\ln\left(\frac{8D}{d}\right) + \ln\left(\frac{\pi D}{2z}\right) \right] \\ &= \frac{100}{2\pi^2 6,68} \left[\ln\left(\frac{8 \cdot 6,68}{0,015}\right) + \ln\left(\frac{\pi \cdot 6,68}{2 \cdot 0,6}\right) \right] \\ &= 8,37 \quad \Omega.\end{aligned}\tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
R_{nek1} &= \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left[\ln \left(\frac{8D}{d} \right) + \ln \left(\frac{\pi D}{2z} \right) \right] \\
&= \frac{100}{2\pi^2 9,23} \left[\ln \left(\frac{8 \cdot 9,23}{0,015} \right) + \ln \left(\frac{\pi \cdot 9,23}{2 \cdot 0,8} \right) \right] \\
&= 6,25 \quad \Omega.
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Výpočet odporu jednej tyče je v tomto prípade rovnaký ako v minulom príklade. Nie je potrebné počítat odpor sústavy tyčí, lebo norma využíva vzorec, v ktorom nastáva výpočet tyčí a spojenie s obvodovou sústavou zároveň.

Dopočítanie sústavy je taktiež na rovnakom princípe ako v minulom príklade. Spojíme obvodové zemniče

$$R_{n12} = \frac{R_{nek1} \cdot R_{nek2}}{R_{nek1} + R_{nek2}} \cdot \frac{1}{\eta_{oo}} = \frac{8,37 \cdot 6,25}{8,37 + 6,25} \cdot \frac{1}{0,69} = 5,18 \quad \Omega \tag{3.17}$$

a celkový výsledok dostaneme pripojením tyčí. Keďže bol použitý iný vzťah pre výpočet D_{ekv2} , bolo potrebné stanoviť nové η_{tn} . Odčítaním z grafu bolo zistené $\eta_{tn} = 0,75$.

$$R = \frac{1}{\frac{\eta_{tn} \cdot n}{R_{tyč}} + \frac{1}{R_{n12}}} \cdot \frac{1}{\eta_{ot}} = \frac{1}{\frac{0,75 \cdot 10}{56,22} + \frac{1}{5,18}} \cdot \frac{1}{0,63} = 4,86 \quad \Omega. \tag{3.18}$$

3.1.3 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 3 [3]

V poslednom prípade podľa [3] je výpočet zjednodušený. Pri výpočte sa nezohľadňuje hĺbka obvodových zemničov. Postup je opäť rovnaký. Ekvivalentné polomery môžeme použiť ako v príklade podľa [2]. Taktiež odpor jednej tyče je rovnaký.

Odpor obvodových zemničov budú sa vypočítajú ako

$$\begin{aligned}
R_{nek1} &= \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \left(\frac{2\pi D}{d} \right) \\
&= \frac{100}{\pi^2 \cdot 6,68} \ln \left(\frac{2\pi \cdot 6,68}{0,015} \right) \\
&= 12,04 \quad \Omega
\end{aligned} \tag{3.19}$$

a

$$\begin{aligned}
R_{nek2} &= \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \left(\frac{2\pi D}{d} \right) \\
&= \frac{100}{\pi^2 \cdot 9,23} \ln \left(\frac{2\pi \cdot 9,23}{0,015} \right) \\
&= 9,07 \quad \Omega.
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Následne ich spojíme pomocou vzorca

$$R_{n12} = \frac{R_{nek1} \cdot R_{nek2}}{R_{nek1} + R_{nek2}} \cdot \frac{1}{\eta_{oo}} = \frac{12,04 \cdot 9,07}{12,04 + 9,07} \cdot \frac{1}{0,7} = 7,39 \quad \Omega. \tag{3.21}$$

Pre spojenie s tyčovou sústavou bude použitý podobný vzorec ako v minulom príklade, a teda kombinuje výpočet sústavy tyčí a spojenie s obvodovými zemniči.

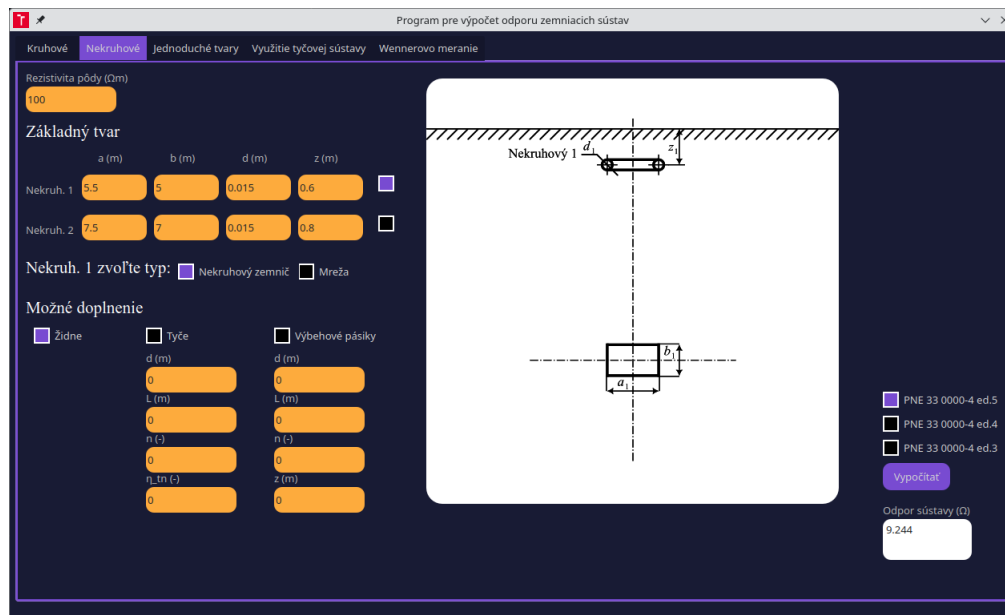
$$R = \frac{1}{\frac{0,9 \cdot \eta_{tn} \cdot n}{R_{tyč}} + \frac{1}{R_{n12}}} = \frac{1}{\frac{0,9 \cdot 0,75 \cdot 10}{56,22} + \frac{1}{7,39}} = 3,92 \quad \Omega. \quad (3.22)$$

3.2 Programové výsledky celkového odporu sústavy

Táto sekcia obsahuje zdokumentované výsledky, ktoré vypočítal program. Tieto výsledky slúžia na porovnanie manuálneho výpočtu.

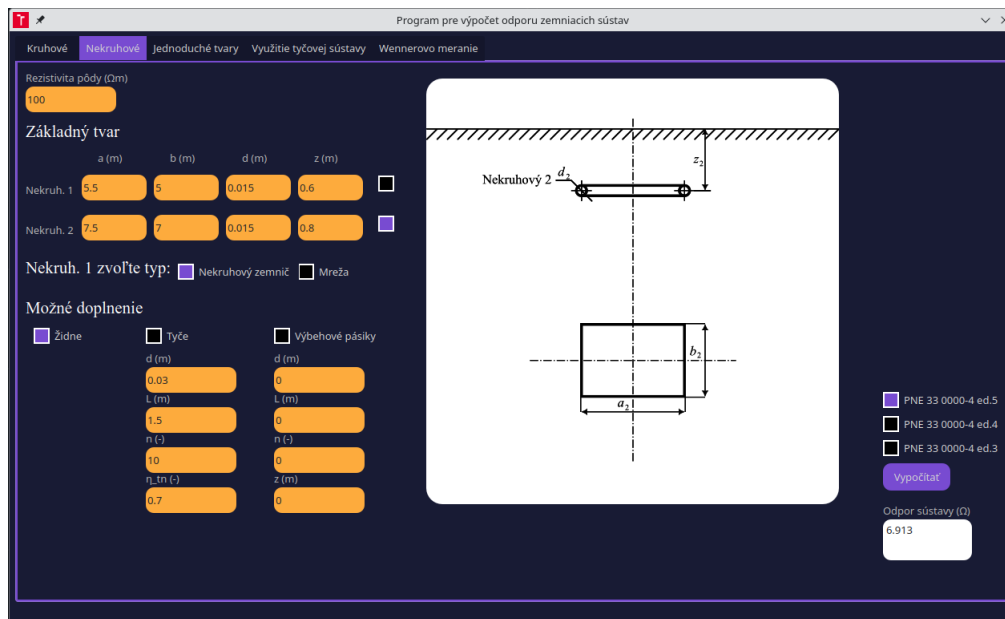
3.2.1 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 5 [1]

Výsledky vypočítané programom podľa [1]. V programovom prostredí je vidieť počítanú kombináciu zemničov.



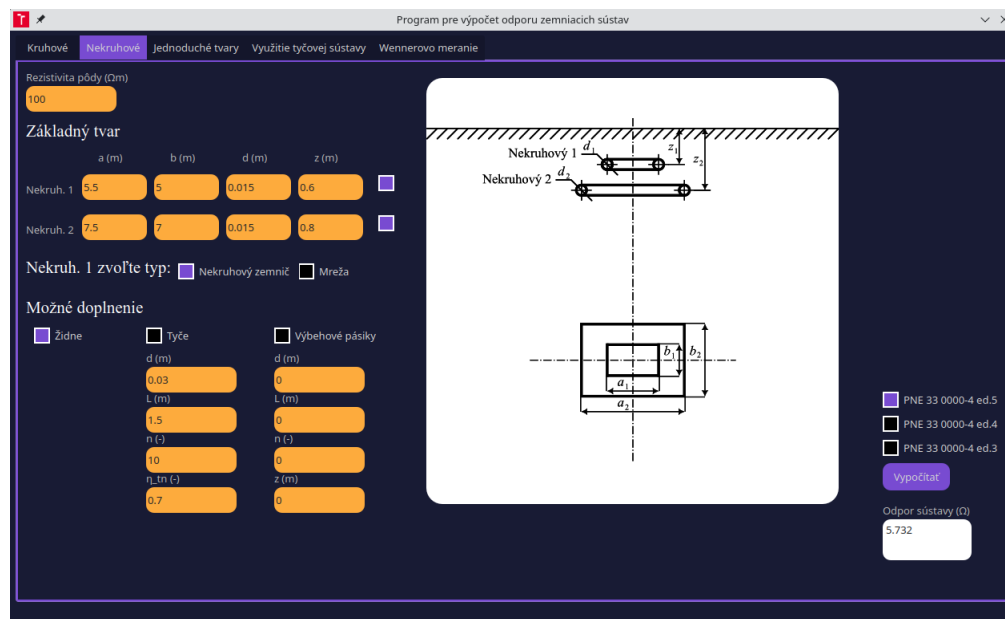
Obr. 3.2: Obvodový zemnič 1 podľa [1]

Výsledok obvodového zemniča 1 je v programe 9,244 Ω.



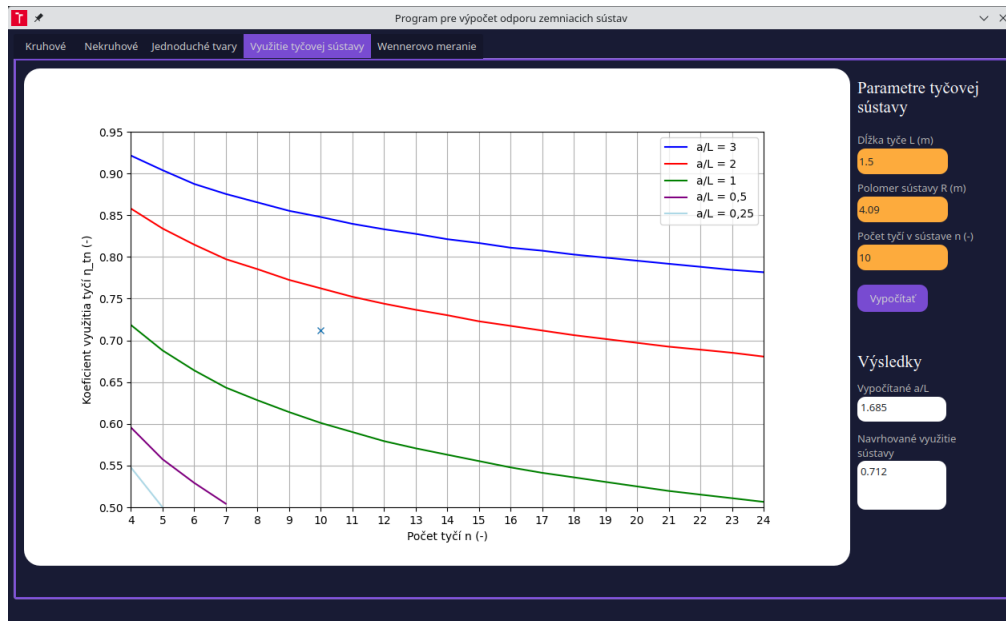
Obr. 3.3: Obvodový zemič 2 podla [1]

Výsledok obvodového zemiča 2 je v programe 6,913 Ω .



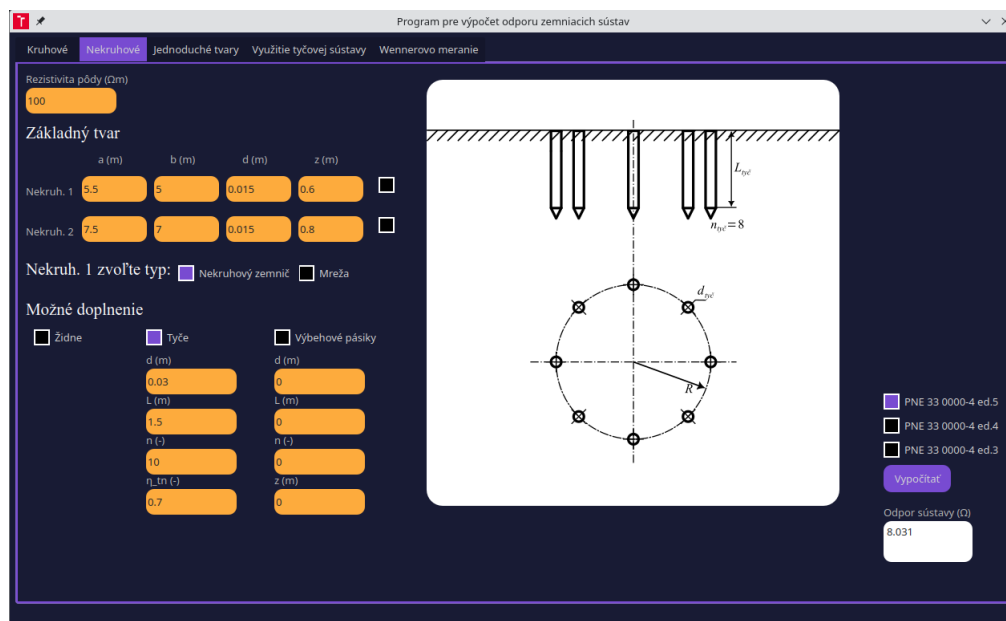
Obr. 3.4: Kombinácia obvodových zemičov podla [1]

Výsledok kombinácie oboch zemičov je podľa programu 5,732 Ω .



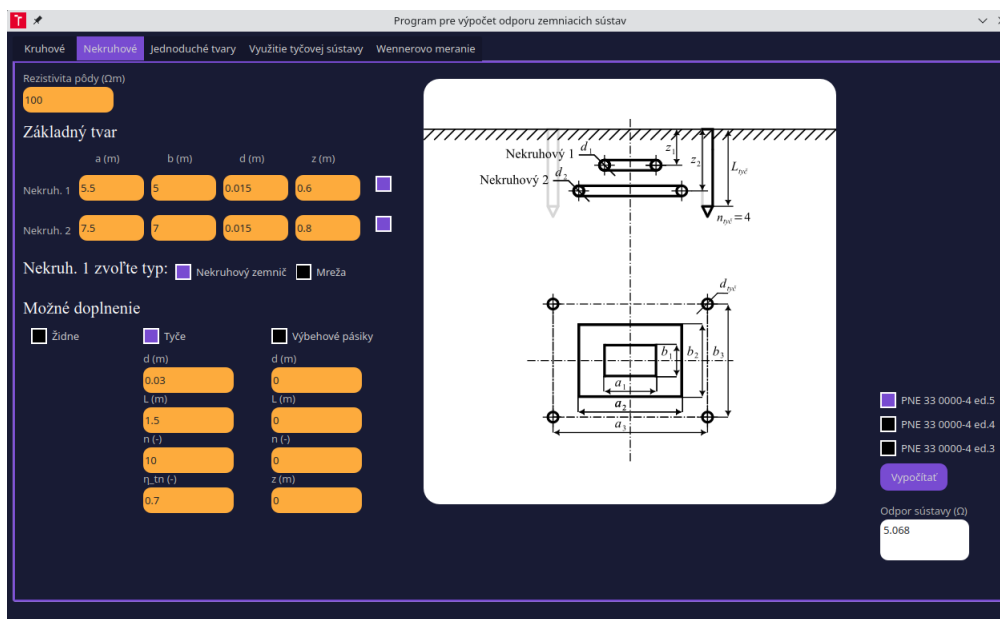
Obr. 3.5: Koefficient využitia tyčovej sústavy podľa [1]

Koefficient využitia tyčovej sústavy bol programom stanovený na 0,712 pomocou lineárnej interpolácie. Parameter a/l sa podľa programu rovná 1,685.



Obr. 3.6: Výpočet tyčovej sústavy podľa [1]

Odpor sústavy tyčí je podľa programu 8,031 Ω .

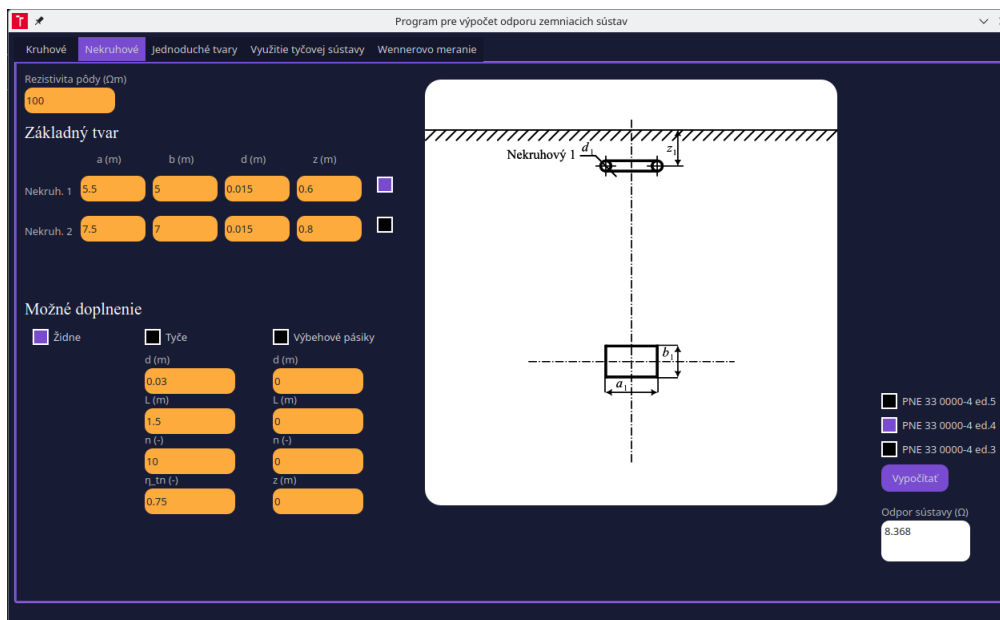


Obr. 3.7: Výpočet celej sústavy 3.1 podla [1]

Celkový odpor sústavy bol stanovený na 5,068 Ω.

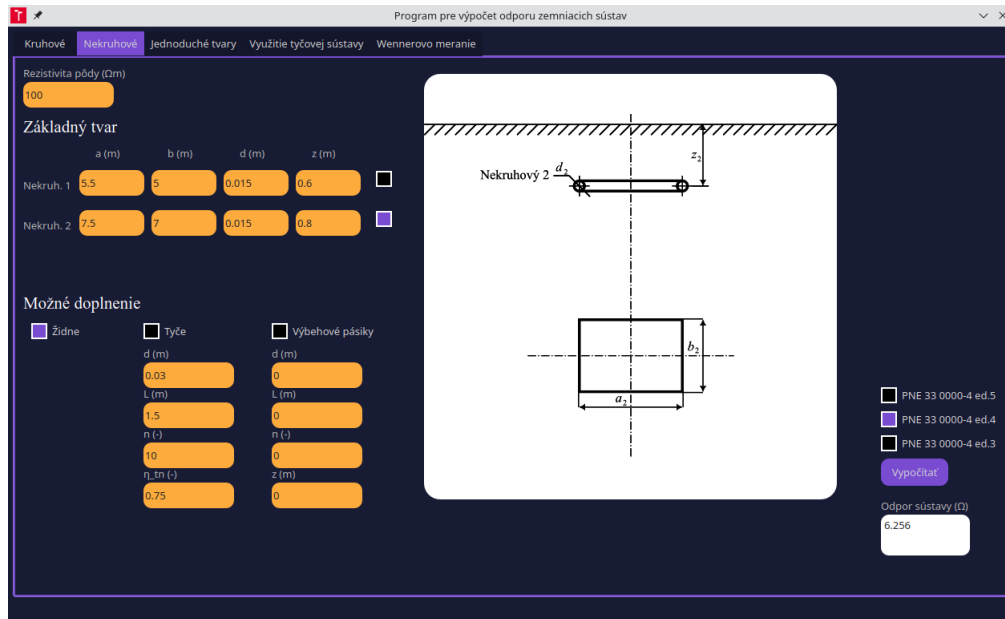
3.2.2 Výpočet podla PNE 33 0000-4 ed. 4 [2]

Nasledujú výsledky stanovené programom podla [2].



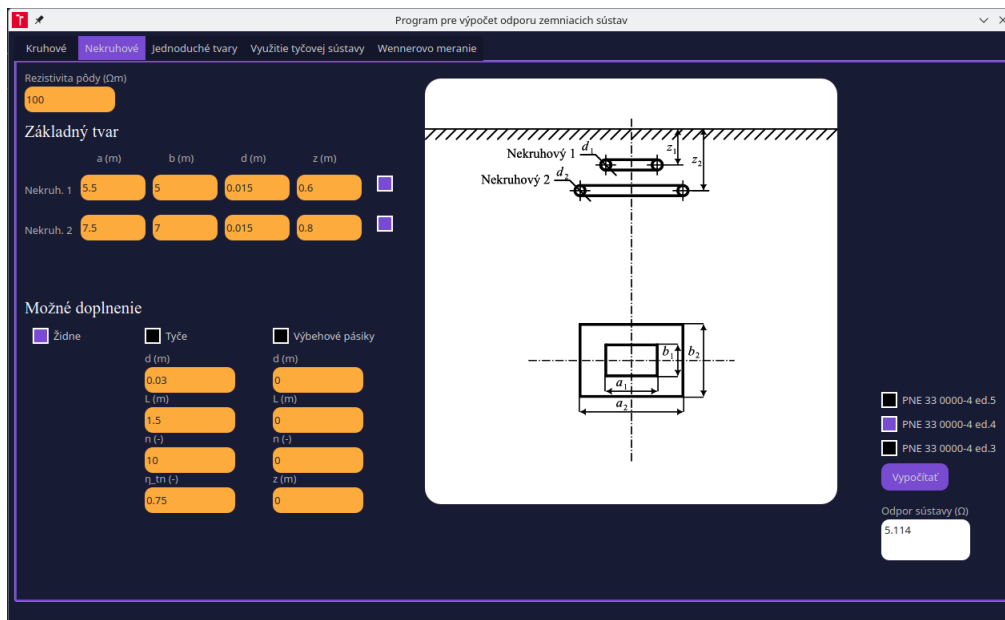
Obr. 3.8: Obvodový zemnič 1 podla [2]

Výsledok pre obvodový zemnič 1 je 8,368 Ω .



Obr. 3.9: Obvodový zemnič 2 podľa [2]

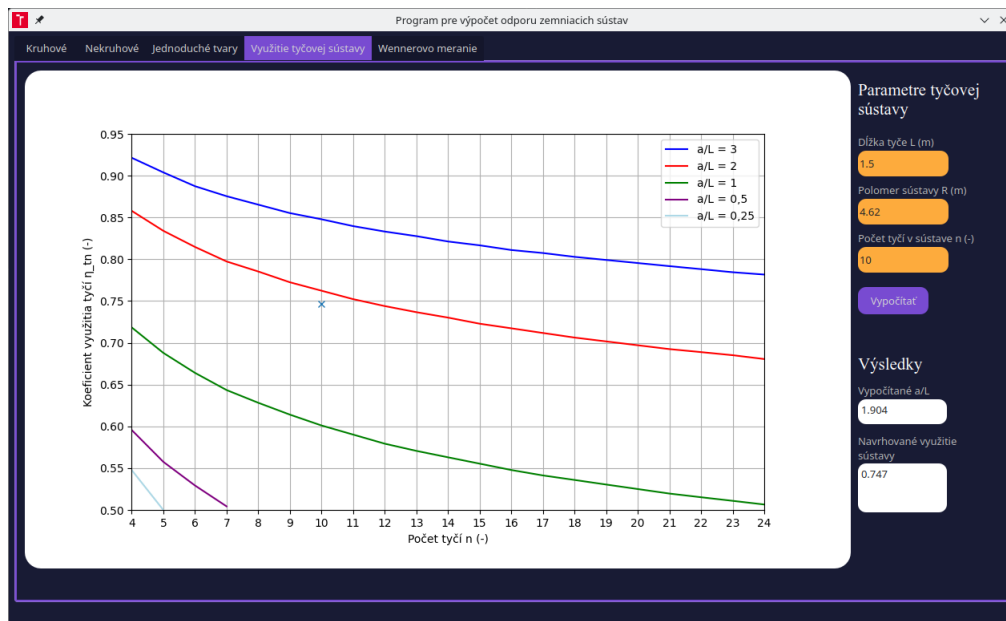
Odpor obvodového zemniča 2 je 6,256 Ω .



Obr. 3.10: Kombinácia obvodových zemničů podľa [2]

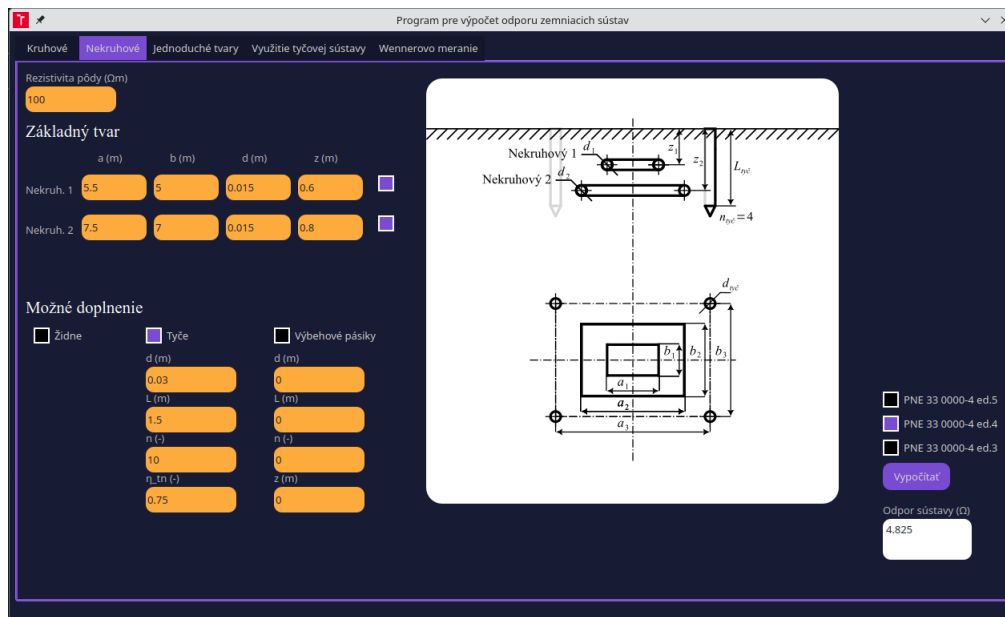
Spojenie oboch obvodových zemničů nadobudlo hodnotu odporu 5,114 Ω .

Pre tyče musel byť stanovený nový koeficient využitia sústavy η_{tn} . Ten bol programom stanovený následovne pomocou lineárnej interpolácie. Tento výsledok bude použitý aj vo výpočte na obrázku 3.16.



Obr. 3.11: Koeficient využitia tyčovej sústavy podľa [2] a [3]

Koeficient využitia tyčovej sústavy bol programom stanovený na 0,747 pomocou lineárnej interpolácie. Parameter a/l sa podľa programu rovná 1,904.

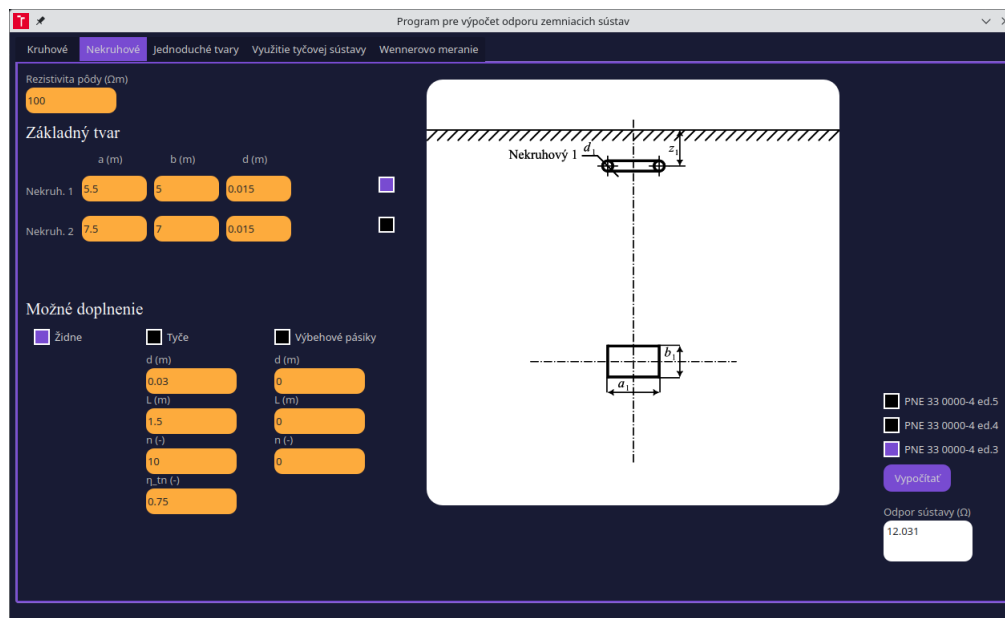


Obr. 3.12: Výpočet celej sústavy 3.1 podľa [2]

Celkový odpor sústavy je podľa programu 4,825 Ω .

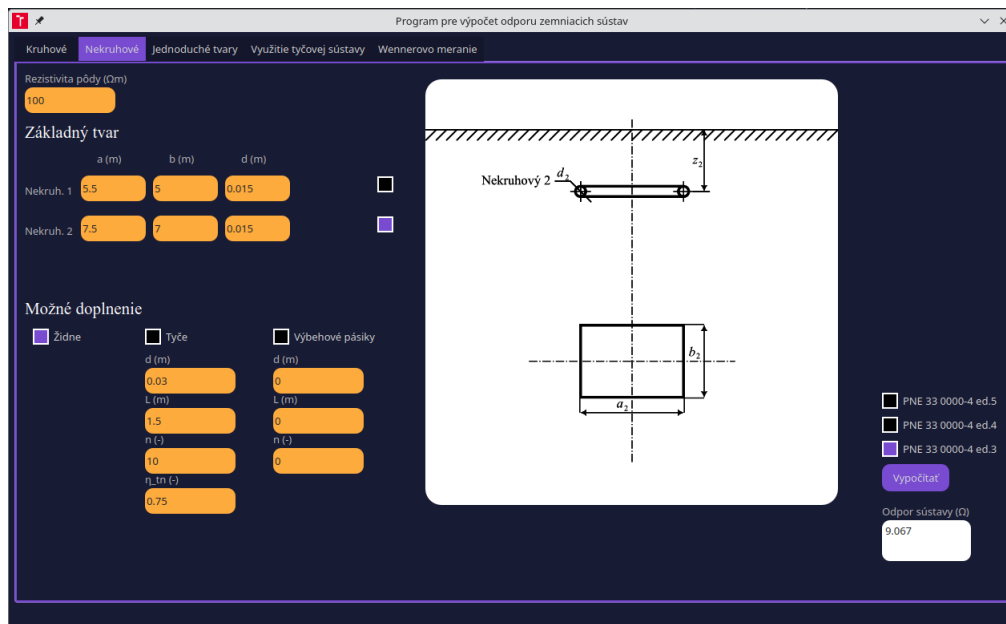
3.2.3 Výpočet podľa PNE 33 0000-4 ed. 3 [3]

Nasledujú výsledky stanovené programom podľa [3].



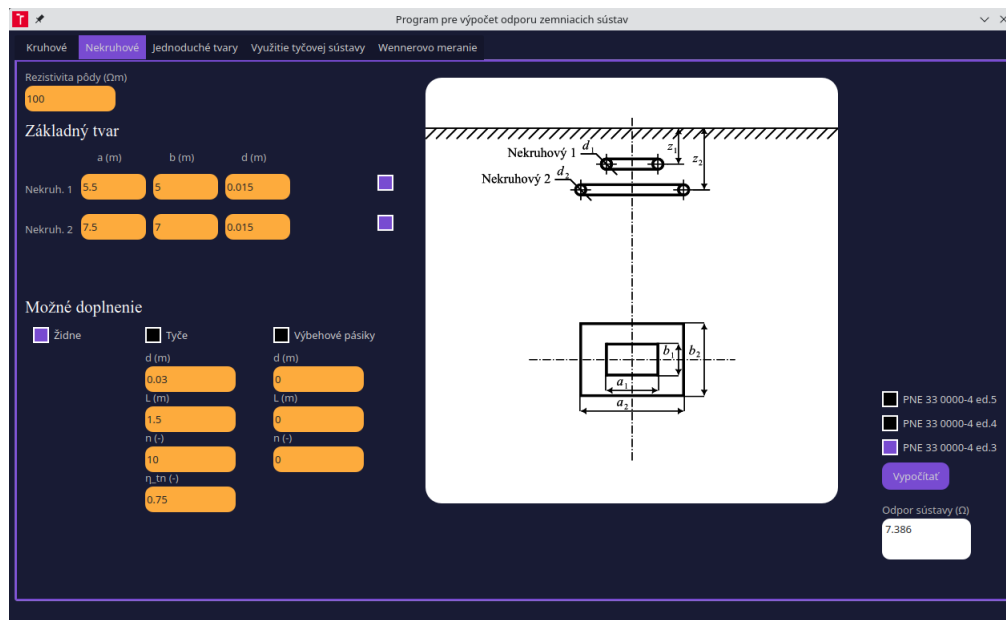
Obr. 3.13: Obvodový zemnič 1 podľa [3]

Výsledok pre obvodový zemnič 1 je 12,031 Ω .



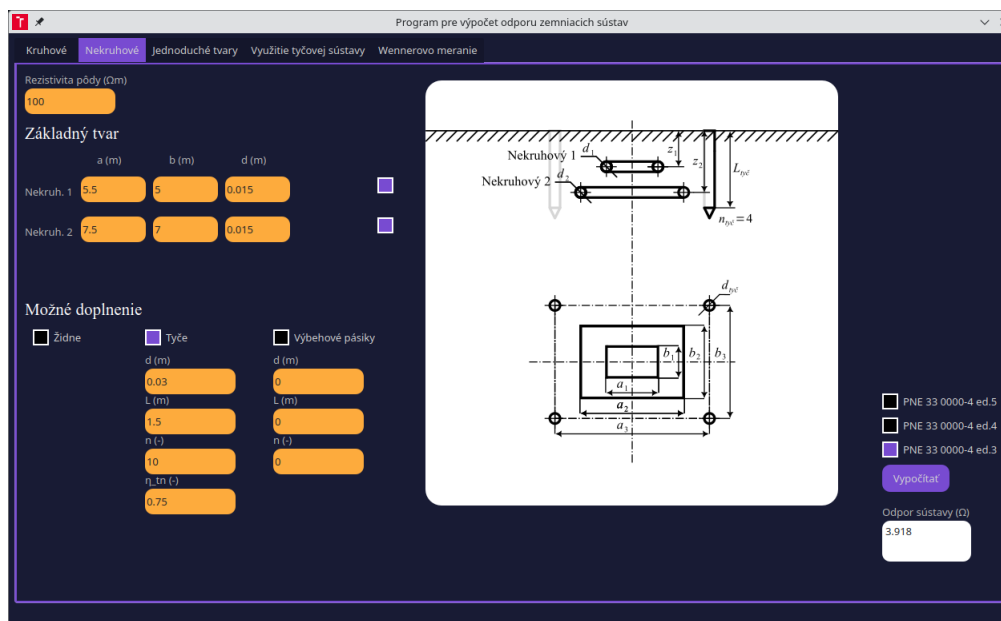
Obr. 3.14: Obvodový zemnič 2 podľa [3]

Odpor obvodového zemniča 2 je 9,067 Ω .



Obr. 3.15: Kombinácia obvodových zemničů podľa [3]

Spojenie oboch obvodových zemničů nadobudlo hodnotu odporu 7,386 Ω .



Obr. 3.16: Výpočet celej sústavy 3.1 podľa [3]

Celkový odpor sústavy je podľa programu 3,918 Ω .

Tab. 3.1: Prehľad výsledkov manuálnym a programovým výpočtom

		R_{nek1} [Ω]	R_{nek2} [Ω]	$R_{tyč}$ [Ω]	R_{ts} [Ω]	R_{n12} [Ω]	R [Ω]
ed. 5	manuálne	9,250	6,910	56,220	8,030	5,730	5,070
	programovo	9,244	6,913	-	8,031	5,732	5,068
ed. 4	manuálne	8,370	6,250	56,220	-	5,180	4,860
	programovo	8,368	6,256	-	-	5,114	4,825
ed. 3	manuálne	12,040	9,070	56,220	-	7,390	3,920
	programovo	12,031	9,067	-	-	7,386	3,918

V tabuľke 3.1 je uvedený prehľad počítaných hodnôt manuálne a pomocou programu pre jednotlivé časti a ich kombinácie.

3.3 Maximálne krokové napätie pre jednoduchý zemič

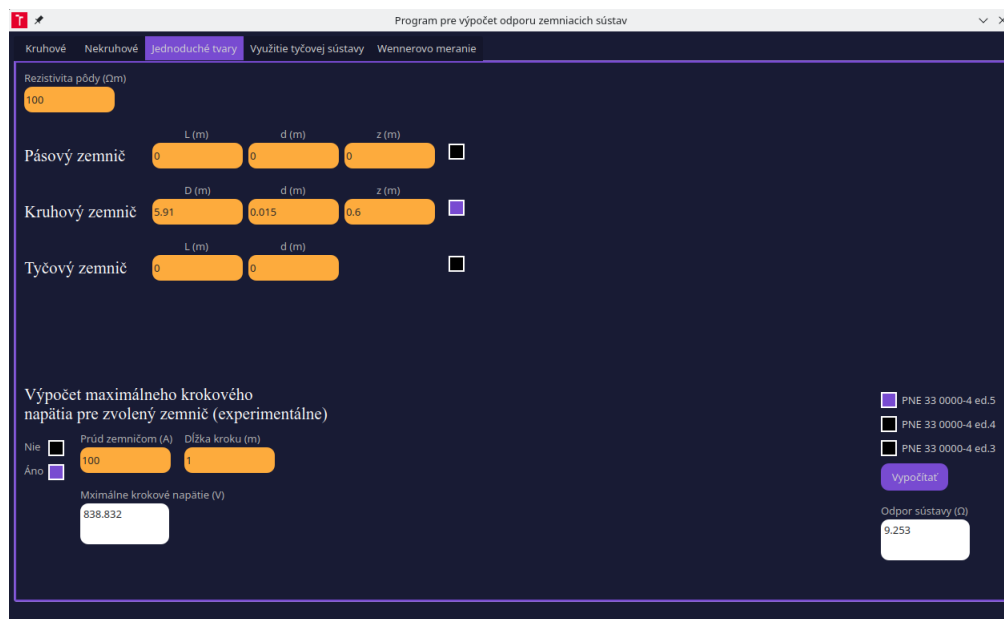
Na základe informácii v časti 2 bol program doplnený o výpočet maximálneho krokového napätia. Ako príklad bude uvedený výpočet zo sekcie 2.2. Ide o výpočet napätia, ktoré by vzniklo ako rozdiel dvoch potenciálov v prípade, že zemič je

na povrchu zeme. Tento rozdiel vznikne tak, že osoba stojaca na okraji zemniča, ktorým preteká prúd, urobí krok (zvyčajne 1 m) von do priestoru.

Ako príklad výpočtu bude zvolený samostatný obvodový zemnič 1 na obrázku 3.1. Podľa výpočtu 3.1.1 sme získali D_{ekv1} . Tento priemer bude použitý ako priemer fiktívneho kruhu. Pomocou 2.62 stanovíme pre tieto parametre: $D_{ekv1} = 5,91$ m, $I = 100$ A, $a = d/2 = 0,0075$ m a $s = 1$ m.

$$\begin{aligned}
 U_{k,max} &= \frac{\rho I}{2\pi^2 r_0} \ln\left(\frac{s}{a}\right) & (3.23) \\
 &= \frac{\rho I}{2\pi^2 \cdot \frac{D_{ekv1}}{2}} \ln\left(\frac{s}{d/2}\right) \\
 &= \frac{100 \cdot 100}{2\pi^2 \cdot \frac{5,91}{2}} \ln\left(\frac{2 \cdot 1}{0,015}\right) \\
 &= 838,832 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Overenie výsledku je na obrázku 3.17.



Obr. 3.17: Maximálne krokové napätie

Výsledok je taktiež 838,832 V.

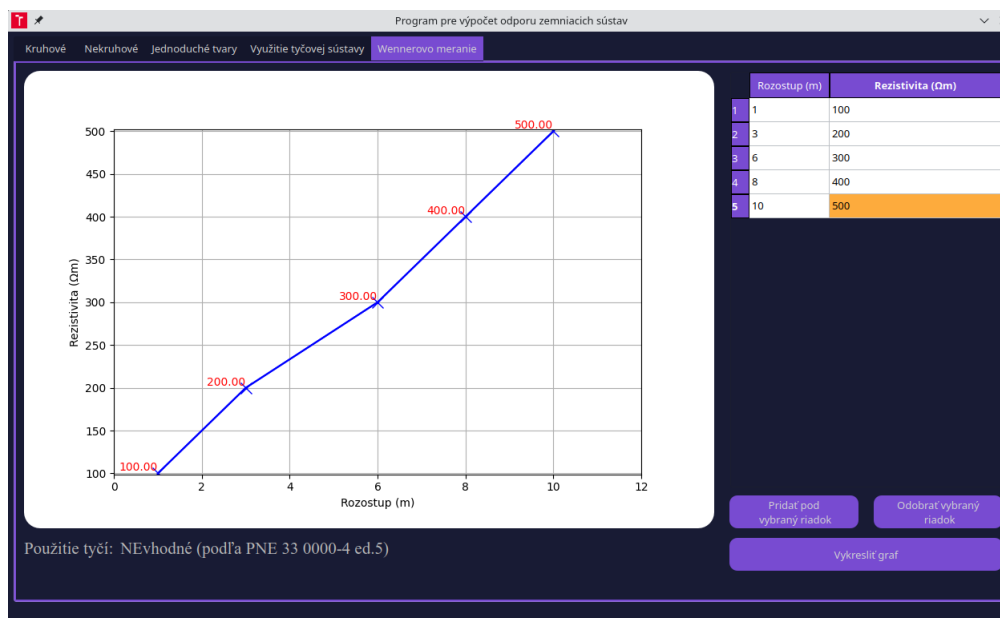
3.4 Stanovenie modelu pôdy na základe Wennerovho merania

Stanovenie modelu pôdy je dobré vykonať preto, aby sme vedeli posúdiť, či využitie tyčí má zmysel. Literatúry [1] a [4] definujú určenie modelu na základe rozstupov v dĺžke 1, 3 a 5 m. Rezistivita odmeraná na týchto rozstupoch je základom pre určenie modelu pôdy. Meraní môže byť samozrejme viac. Na základe meraní sme schopní skonštruovať graf a vyhodnotiť, či ide o model **HoL** alebo **LoH**.

Tab. 3.2: Viac rozstupov

č. merania	ρ_1 [Ωm]	ρ_3 [Ωm]	ρ_6 [Ωm]	ρ_8 [Ωm]	ρ_{10} [Ωm]	Model
1	100	200	300	400	500	LoH
2	100	80	70	60	50	HoL
3	100	50	80	70	90	Homogénna

V tabulke 3.2 sú vyhodnotenú modely pôdy na základe podmienok stanovených podľa [4]. **HoL** je model, ktorého podložie je vodivejšie ako jeho povrch. **LoH** je model, ktorý má tieto vodivosti naopak. Pre homogénny model sa vodivosti od seba veľmi nelíšia. Neurčitý model je taký, v ktorom hodnoty rezistivity nevykazujú jednotný trend nárastu alebo klesania. V prípade modelu **HoL** je vhodné použiť tyče. Táto funkcia určovania, či je opodstatnené používať tyčové sústavy, bola implementovaná do programu.



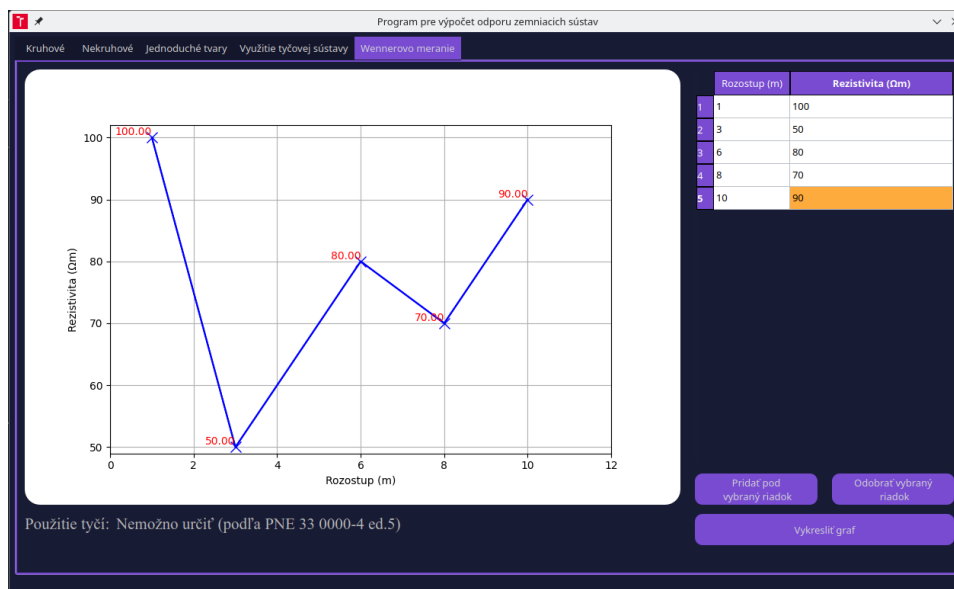
Obr. 3.18: Model **LoH** s viacerými rozstupmi podľa [4] a [1]

Na obrázku 3.18 boli použité hodnoty merania č. 1 z tabuľky 3.2. Program určil, že pre tento model nie je vhodné použiť tyče.



Obr. 3.19: Model **HoL** s viacerými rozstupmi podľa [4] a [1]

Hodnoty na obrázku 3.20 sú z tabuľky 3.2 č. merania 2. Pre tento model bolo vyhodnotené použitie tyčí ako opodstatnené.



Obr. 3.20: Homogénny model s viacerými rozstupmi podľa [4] a [1]

Ako posledný bol overený homogénny model z tabuľky 3.2, ktorý zodpovedá číslu merania 3. Pre tento model program zobrazil výsledok, že nie je možné správne zhodnotiť použitie tyčovej sústavy.

4 Dokumentácia programu a manuál

Program je písaný v programovacom jazyku **Python 3** [8]. Tento jazyk bol zvolený preto, že jeho syntax a celková práca s ním je jednoduchá a zrozumiteľná. Podporuje množstvo knižníc, ktoré dokážu spracovať číselné výpočty, tvoriť grafické rozhrania a iné. Tieto kľúčové vlastnosti boli dôležité pre výber tohto nástroja na splnenie zadania.

Ako prvý krok bola tvorba grafického rozhrania. Aby bol návrh jednoduchší, bol zvolený program **Qt Designer** [9]. V ňom bola vytvorená šablóna grafického rozhrania vďaka what-you-see-is-what-you-get (WYSIWYG) [9]. Do rozmerovo definovaného okna boli následne vložené preddefinované widgety. Použité widgety sú:

- `MainWindow` - vytvorí hlavné okno programu s pevným rozmerom,
- `TabWidget` - záložky s jednotlivými časťami programu,
- `LineEdit` - program získava dáta vo formáte string,
- `Label` - texty pre popis,
- `TextBrowser` - zobrazenie výsledku s možnosťou kopírovania,
- `RadioButton` - dovoľuje užívateľovi zvoliť jednu z možností (výber edície normy),
- `CheckBox` - dovoľuje užívateľovi zvoliť viacero možností (voľba sústavy),
- `PushButton` - tlačidlo, na ktoré sú naviazané funkcie (výpočet),
- `TableWidget` - tabuľka (Wennerovo meranie).

Takto vytvorený dokument má príponu `*.ui`. Preklad do kódu, ktorý bolo možné editovať, zabezpečil nástroj **Pyuic5 Tool** [10]. Po jeho spustení nastal prevod z `*.ui` na `*.py`.

Aby program mohol vypočítať užívateľom definovanú sústavu, bolo potrebné načítať dáta z pripravených buniek. Od užívateľa sa vyžaduje zadať číslo v dátovom type float alebo integer. Program načíta hodnotu vo formáte string a pomocou pretypovania prevedie string na float. Pri zadávaní znaku desatinného oddelenia bol braný ohľad na to, aby užívateľ mohol zadať desatinnú bodku alebo desatinnú čiarku. V programe sa nahradí čiarka za bodku automaticky. V prípade, že sa užívateľ pomýli a zadá nesprávny formát čísla, program ho upozorní červeným podfarbením a chybovou správou vo výpise výsledku. Táto funkcia funguje tak, že pri stlačení tlačidla na výpočet sa skontrolujú všetky vstupné bunky a načítané dáta sa skúšajú previesť na dátový typ float. Ak sa to programu nepodarí, užívateľ zadá napríklad znak, vyhodnotí to ako chybu a graficky upozorní na problém. Výhodou je, že program nevyhodnotí chybu a je potrebné ju hľadať, ale presne lokalizuje miesto chyby. Touto vlastnosťou sa zrýchli práca s programom.

Hlavným problémom pri tvorbe programu bola implementácia viacerých edícií. Program preto hľadá kombinácie, ktoré užívateľ vybral a následne pomocou vstupných dát vyhodnotí výsledok. Z tohto dôvodu sa v programe nevyskytuje napríklad

základový zemnič z [3]. Užívateľ má preto na výber výpočet zemničov, ktoré sa nachádzajú vo všetkých edíciách.

Ďalším problémom je samotná edícia 3 [3]. V nej sa neberie do úvahy hĺbka uloženia jednotlivých zemničov a doplnenie sústavy dvoch kruhových zemničov o tretí kruhový zemnič. Riešením je, že po kliknutí na výber tejto edície sa schovajú bunky pre zadávanie hĺbky a výber tretieho kruhového zemniča. Užívateľ tak nezadá nesprávne parametre alebo zlý výber sústavy.

Odozva programu na výber sústavy je riešená pomocou obrázka. Na základe kombinácie sa vyberie a zobrazí typová sústava. V nej sú popísané jednotlivé parametre, ktoré sú od užívateľa požadované. Obrázok je fixný a jeho veľkosti sa nemenia v závislosti od zadaných parametrov. Slúži len ako pomôcka.

V programe sú použité ďalšie knižnice. Z knižnice **math** boli použité funkcie `log`, `pi`, `sqrt`, `cos`, `radians`. Všetky tieto funkcie zabezpečujú prácu s číslami. Grafy sú generované knižnicou **matplotlib** [11]. Na prácu s poliami ako s vektormi alebo maticami slúži knižnica **NumPy** [12]. Ako posledná bola importovaná knižnica **ReportLab PDF Toolkit** [13]. Vďaka nej je program schopný transformovať pripravený text, ktorý sa doplní o konkrétne hodnoty, do *.pdf formátu.

4.1 Karta Kruhové

Po spustení programu sa ako prvá zobrazí karta s názvom Kruhové. Táto karta slúži na výpočet zemniacich sústav, ktorých základným prvkom je kruhový zemnič. Okno môžeme rozdeliť na dve časti. Na ľavej strane od vizualizácie sústavy sú vyžadované rozmery sústav a zároveň voľba prvkov sústavy. Na pravej strane od vizualizácie je možnosť výberu normy a tlačidlo pre výpočet s bunkou pre výsledok.

Edíciu normy si užívateľ môže vždy zvoliť len jednu, pričom v základom nastavení je vybraná edícia 5. V prípade, že je vybraná edícia 5 alebo edícia 4, je možnosť definovať sústavu ako tieto kombinácie:

- Samostatné prvky
 - Kruh 1,
 - Kruh 2,
 - Kruh 3,
 - Výbehové pásiky,
 - Tyče.
- Kombinácie dvoch prvkov
 - Kruh 1 + Kruh 2,
 - Kruh 1 + Kruh 3,
 - Kruh 1 + Výbehové pásiky,
 - Kruh 1 + Tyče,

- Kruh 2 + Kruh 3,
- Kruh 2 + Výbehové pásiky,
- Kruh 2 + Tyče.
- Kombinácie troch prvkov
 - Kruh 1 + Kruh 2 + Kruh 3,
 - Kruh 1 + Kruh 2 + Výbehové pásiky,
 - Kruh 1 + Kruh 2 + Tyče.

V prípade výberu edície 3 sa možnosti ukrátiť o tretí kruhový zemnič, ktorý sa v edícii nenachádza. Preto je možné definovať nasledovné kombinácie:

- Samostatné prvky
 - Kruh 1,
 - Kruh 2,
 - Výbehové pásiky,
 - Tyče.
- Kombinácie dvoch prvkov
 - Kruh 1 + Kruh 2,
 - Kruh 1 + Výbehové pásiky,
 - Kruh 1 + Tyče,
 - Kruh 2 + Výbehové pásiky,
 - Kruh 2 + Tyče.
- Kombinácie troch prvkov
 - Kruh 1 + Kruh 2 + Výbehové pásiky,
 - Kruh 1 + Kruh 2 + Tyče.

Pre zadanie hodnoty rezistivity pôdy, priemerov D pre Kruh 1, Kruh 2 a Kruh 3, priemerov materiálu d a hĺbky uloženia z sa vyžaduje kladné celé alebo desatinné číslo v metroch. Veľkosti priemerov D musia byť ešte zadané podľa nerovnice $D_1 < D_2 < D_3$.

Rovnaké podmienky platia aj pre Tyče a Výbehové pásiky. Jediná výnimka je počet tyčí a počet pásikov. V nich je užívateľ povinný zadať celé číslo. Pri výbere edície 5 je obmedzený počet tyčí na 4 alebo 8 až 10. Iné čísla nie sú akceptované. Pre edície 3 a 4 je možné zadať ľubovoľný počet tyčí. Jedinou limitáciou je graf na odčítanie využitia sústavy. Pásiky môžeme pridať buď jeden alebo dva. Iné číslo nie je akceptované.

Po splnení všetkých týchto podmienok by program mal vypočítať výsledok celkovej sústavy. Zároveň sa po stlačení tlačidla Vypočítať vygeneruje report, ktorý obsahuje rozmery prvkov sústavy a ich odpor, celkový odpor sústavy a edíciu normy, podľa ktorej bol výsledok dosiahnutý.

4.2 Karta Nekruhové

Na tejto karte sa vo svojej podstate deje to isté ako na karte Kruhovej. Rozdielom je, že ak je zemnič nekruhového tvaru, zadávajú sa rozmery dĺžka a a šírka b . Pre zadávanie čísel platia tie isté podmienky, ako je popísané v časti Kruhové.

Možnosti konfigurácie sústavy pre edíciu 5 sú nasledovné:

- Samostatné prvky
 - Nekruhový 1,
 - Nekruhový 2,
 - Mreža,
 - Výbehové pásiky,
 - Tyče.
- Kombinácie dvoch
 - Nekruhový 1 + Výbehové pásiky,
 - Nekruhový 1 + Tyče,
 - Nekruhový 1 + Nekruhový 2,
 - Mreža + Výbehové pásiky,
 - Mreža + Tyče,
 - Mreža + Nekruhový 2,
 - Nekruhový 2 + Výbehové pásiky,
 - Nekruhový 2 + Tyče.
- Kombinácie troch
 - Mreža + Nekruhový 2 + Výbehové pásiky,
 - Mreža + Nekruhový 2 + Tyče,
 - Nekruhový 1 + Nekruhový 2 + Výbehové pásiky,
 - Nekruhový 1 + Nekruhový 2 + Tyče.

Edícia 5 je rozšírená o mrežu. Preto edície 4 a 3 sú ukrátené o túto konfiguráciu.

Možnosti pre edície 4 a 5 sú:

- Samostatné prvky
 - Nekruhový 1,
 - Nekruhový 2,
 - Výbehové pásiky,
 - Tyče.
- Kombinácie dvoch
 - Nekruhový 1 + Výbehové pásiky,
 - Nekruhový 1 + Tyče,
 - Nekruhový 1 + Nekruhový 2
 - Nekruhový 2 + Výbehové pásiky,
 - Nekruhový 2 + Tyče.

- Kombinácie troch
 - Nekruhový 1 + Nekruhový 2 + Výbehové pásiky,
 - Nekruhový 1 + Nekruhový 2 + Tyče.

4.3 Karta Jednoduché tvary

Ponúka výpočet odporu jednoduchých tvarov zemničov a výpočet maximálneho krokového napätia. Keďže ide o jednoduché tvary, užívateľ si vždy môže zvoliť len jeden z týchto tvarov:

- Pásový zemnič,
- Kruhový zemnič,
- Tyčový zemnič.

Výpočet odporu sa riadi voľbou edície, a je teda počítaný pomocou [3], [2] a [1]. V ľavom dolnom rohu si môže užívateľ zvoliť výpočet maximálneho krokového napätia. Po kliknutí na Áno sa od užívateľa očakáva zadať celé alebo desatinné kladné čísla do buniek Prúd zemničom v ampéroch a do Dĺžka kroku v metroch. Výpočet maximálneho krokového napätia je výpočet na základe [5]. Preto je pri výpočte upozornenie, že táto funkcia je experimentálna. To znamená, že by výsledná hodnota mala byť chápaná ako orientačná. Výpočet uvažuje situáciu, kedy je zemnič na povrchu a osoba na ňom stojaca urobí krok smerom von od zemniča. Pri výpočte tejto karty nie je generovaný report.

4.4 Karta Využitie tyčovej sústavy

V tejto časti sa na základe parametrov dĺžka tyče, polomer sústavy a počet tyčí určuje využitie tyčovej sústavy η_{tn} , ktoré je potrebné pri výpočtoch s tyčovými prvkami na kartách Kruhové a Nekruhové.

Hlavným informačným prvkom na tejto karte je digitalizovaný graf prevzatý z [1]. Od užívateľa sa vyžaduje zadať celé alebo desatinné kladné čísla do buniek Dĺžka tyče v metroch, Polomer sústavy (tyčovej) v metroch a celé číslo do Počet tyčí v sústave. Po kliknutí na tlačidlo vypočítať program zobrazí parameter a/L a využitie tyčovej sústavy η_{tn} . Parameter a/L je vypočítaný na základe [1].

Navrhované využitie sústavy sa v grafe v priestore medzi krivkami určuje na základe lineárnej interpolácie. Linearizovanie je použité aj ako extrapolácia nad krivkou $a/L = 3$ a pod krivkou $a/L = 1$. Preto je vhodné, aby užívateľ posúdil, či by výsledok mohol byť v týchto častiach grafu validný. Z tohto dôvodu sa zobrazuje parameter a/L , aby sa mohlo využitie tyčovej sústavy presnejšie odhadnúť.

4.5 Karta Wennerovo meranie

Karta slúži na určenie modelu pôdy. Na základe určeného modelu je potom programom posúdené, či použitie sústavy tyčí má svoje opodstatnenie. Užívateľ pridá riadok kliknutím na Pridať pod vybraný riadok a následne môže zadať rozstup tyčí počas merania v metroch a nameranú hodnotu rezistivity pre príslušný rozstup. V prípade, že užívateľ chce odstrániť riadok, stačí kliknúť na Odobrať vybraný riadok. Kliknutím na Vykresliť graf sa zobrazí priebeh rezistivity na rozostupe. Pod grafom sa program vyjadří, či je použitie tyčí vhodné, nevhodné alebo sa to nedá na základe hodnôt určiť.

Program vyhodnocuje model pôdy na základe dvoch metód. Prvým sú podmienky na určenie typu pôdy stanovené v [1], kde je potrebné zadať rozstupy práve pre 1, 3 a 5 metrov. Druhý spôsob vychádza z viac ako troch meraní. V ňom sa určuje, či rezistivita má tendenciu rásť, klesať alebo sa nemení. Program si spôsob určenia vyberie sám na základe počtu rozstupov.

Záver

Cielom tejto práce bolo vytvoriť program, ktorý počíta odpory zemniacich sústav. Okrem výpočtov sústav bol doplnený o niekoľko rozširujúcich funkcií, ktoré majú zjednodušiť prácu s programom. Program podporuje tri edície podnikovej normy PNE 33 0000-4. Pre program je napísaná aj časť kódu pre grafické rozhranie, vďaka ktorému nie je potrebné využívať externé programy. Výhodou zvoleného programovacieho jazyka Python 3 je možné používať program na viacerých operačných systémoch. Pri tvorbe boli testované operačné systémy Microsoft Windows 10 a Manjaro Linux.

V kapitole 3 bol vzorovo vypočítaný príklad sústavy podľa všetkých edícií. Pomocou nich boli testované výsledky programu. Ako je možné vidieť, programové výpočty sa zhodujú s ručným výpočtom. Drobné odchýlky vznikli zaokrúhľovaním a odčítaním z grafu. Keďže program pracuje s číslami v dátovom type float, sú jeho výsledky považované za presnejšie.

V prípade grafu s určením využitia sústavy by bolo vhodné nájsť lepší riešenie na extrapoláciu. V niektorých prípadoch sa môže stať, že sústava je využitá na viac ako 100 %. Možné riešenie by bolo podľa literatúry [5]. Problémom však bolo, že grafy neboli totožné s [1] a zároveň vychádzali z iných vstupných parametrov. Preto by bolo vhodné zistiť pôvod grafu v [1] a spresniť tak výpočet.

Program zároveň neobsahuje všetky typy používaných zemničov. Aby bol univerzálnejší, nachádzajú sa v ňom prvky, ktoré sú rovnaké vo všetkých edíciách. Bolo by možno vhodnejšie v ďalšom vývoji venovať každej edícii samostatnú kartu, v ktorej by sa nachádzali všetky typy zemničov a ich kombinácie.

Ako rozšírenie bol navrhnutý report navrhutej sústavy. V prípade, že by sa program využil v praxi, je vhodné, aby konštruktérom sústavy bol poskytnutý návrh sústavy s rozmermi. Príklad reportu zo sústave počítanej v kapitole 3 je v prílohe A.1.

Literatúra

- [1] VUT BRNO, VYČÍTAL, Václav a TOPOLÁNEK, David. PNE 33 0000-4, *Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny*. 5. vydání.
- [2] EGC-ENERGOCONSULT ČB, PROCHÁZKA, Karel, VUT BRNO, VYČÍTAL, Václav. PNE 33 0000-4, *Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny*. 4. vydání.
- [3] ÚJV ŘEŽ, A.S. DIVIZE ENERGOPROJEKT PRAHA, BÁRTA, Jaroslav. PNE 33 0000-4, *Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny*. Třetí vydání.
- [4] VYČÍTAL, Václav; TOPOLÁNEK, David; PTÁČEK, Michal a TOMAN, Petr. Přesnost a způsob výpočtu zemních odporů analytickým výpočtem v souladu s PNE 33 0000-4. In: *Sborník 26. konference ČK CIREC 2023*. České Budějovice: EGC - EnerGoConsult ČB, 2023, s. 1-14. ISBN 978-80-908793-1-7.
- [5] OSOLSOBĚ, Jan a ZAPLETAL, Mirko. *Zemnění a bezpečnost*. Praha: Nakladatelství ČSAV, 1964.
- [6] RÜDENBERG, Reinhold. Grounding principles and practice I - Fundamental considerations on ground currents. Online. *Electrical engineering (New York, N.Y.)*. 1945, roč. 64, č. 1, s. 1-13. ISSN 0095-9197. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EE.1945.6440813>. [cit. 2023-10-07].
- [7] KOČVARA, Antonín. *Uzemňování elektrických zařízení*. Praha: STRO.M, 1995.
- [8] Van Rossum, Guido and Drake, Fred L. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN 1441412697.
- [9] Qt Company Ltd. Qt Designer verzia 5.15.12, <https://www.qt.io/>.
- [10] ABDELRAHMAN, Ahmed. *Pyuic5 Tool*. Dostupné z: <https://github.com/Abdelatif/Pyuic5-Tool/tree/master>.
- [11] HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*. 2007, č. 3, s. 90–95.
- [12] HARRIS, Charles R.; MILLMAN, K. Jarrod; VAN DER WALT, Stéfan J.; GOMMERS, Ralf; VIRTANEN, Pauli et al. Array programming with NumPy. Online. *Nature*. Roč. 585, č. 7825, s. 357-362. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>. [cit. 2024-05-09].

- [13] ROBINSON, Andy; BECKER, Robin; The ReportLab team and the community. *reportlab 4.1.0-1*. Dostupné z: <https://docs.reportlab.com/>.

Zoznam symbolov a skratiek

Skratky:

Skratka	Popis
HoL	Model pôdy, ktorého podložie je vodivejšie ako jeho povrch.
LoH	Model pôdy, ktorého podložie je menej vodivé ako jeho povrch.

Symboly:

Symbol	Popis	Jednotka
$2l$	Dĺžka pozdĺžneho zemniča	m
$2z$	Vzdialenosť stredov dvoch guľ	m
a	Polomer elektródy	m
a_{kl}	Vzdialenosť medzi elektródami s označením k a l	m
a/L	Pomer medzi vzdialenosťou dvoch tyčí a ich dĺžkou	-
d	Priemer materiálu	m
$d\xi$	Element dĺžky pozdĺžneho zemniča	m
h	Hĺbka pozdĺžneho zemniča	m
i	Prúd vytekajúci z jedného metra	Am^{-1}
n	Počet tyčí	-
r	Vzdialenosť medzi stredom kruhu a bodom P v smere x	m
r_o	Polomer kruhu	m
r_p	Vzdialenosť medzi $d\xi$ a bodom $P(x, y)$	m
s	Dĺžka kroku	m
x	Polomer od elektródy	m
y	Vzdialenosť bodu od elektródy	m
z	Vzdialenosť medzi stredom kruhu a bodom P v smere y	m
D	Stredný priemer plochy siete	m
D	Priemer kruhu	m
D_{ekv}	Náhradný priemer nekruhového zemniča	m
E	Intenzita elektrického poľa	Vm^{-1}
E_a	Intenzita elektrického poľa pozdĺž povrchu doskového zemniča	Vm^{-1}
E_{max}	Maximálna intenzita elektrického poľa	Vm^{-1}
E_0	Intenzita elektrického poľa pre malé vzdialenosti	Vm^{-1}
E_∞	Intenzita elektrického poľa pre veľké vzdialenosti	Vm^{-1}
I	Prúd	A
I_{fault}	Jednofázový poruchový prúd	A
I_k	Prúd elektródou s označením k	A

I_1	Prúd symetricky rozloženými elektródami v kruhu	A
J	Prúdová hustota	Am^{-2}
J_{str}	Stredná prúdová hustota	Am^{-2}
L	Celková dĺžka vodičov	m
R	Polomer kruhového zemniča	m
R	Odpor	Ω
R_n	Odpor kombinácie dvoch nekruhových zemničov	Ω
R_{nek}	Odpor nekruhového zemniča	Ω
R_{ts}	Odpor sústavy tyčí	Ω
$R_{tyč}$	Odpor jednej tyče	Ω
R_z	Zemný odpor	Ω
R'	Odpor elektródy na povrchu	Ω
R_0	Odpor jednej tyčovej elektródy	Ω
R_∞	Odpor sústavy s nekonečne vzdialenými elektródami	Ω
S	Plocha siete	m^2
U	Napätie	V
$(U_{k,max})_y$	Maximálne krokové napätie v smere y	V
$(U_{k,max})_{x0}$	Maximálne krokové napätie v smere x	V
U_{us}	Napätie na uzemňovacej sústave	V
U_0	Napätie proti zemi	V
V	Potenciál	V
V_a	Potenciál v bode a	V
V_l'	Vlastný potenciál tyče s označením l	V
V_s	Potenciál na povrchu zeme v strede kruhu	V
V_x	Potenciál v bode x	V
V_y	Potenciál v bode y	V
V_{2z}	Potenciál gule vzdialenej $2z$	V
V_∞	Potenciál pre veľmi vzdialené body	V
η	Stupeň využitia elektród	-
η_{oo}	Koeficient pre kombináciu dvoch kruhových zemničov	-
η_{ot}	Koeficient pre kombináciu kruhového a tyčového zemniča	-
η_{tn}	Využitie tyčovej sústavy	-
ϑ	Uhol	rad
ρ	Rezistivita pôdy	Ωm

A Prílohy

A.1 Report vygenerovaný programom

Zemniaca sústava s nekrhovými zemničmi

Report bol vygenerovaný automaticky podľa PNE 33 0000-4 ed. 5

Rezistivita pôdy: 100 Ωm

Nekruhový zemnič 1

Dĺžka a: 5.5 m

Šírka b: 5 m

Priemer materiálu d: 0.015 m

Hĺbka uloženia z: 0.6 m

Odpor zemniča R: 9.244 Ω

Nekruhový zemnič 2

Dĺžka a: 7.5 m

Šírka b: 7 m

Priemer materiálu d: 0.015 m

Hĺbka uloženia z: 0.8 m

Odpor zemniča R: 6.913 Ω

Sústava tyčí

Priemer tyče d: 0.03 m

Dĺžka tyče L: 1.5 m

Počet tyčí n: 10

Využitie sústavy η : 0.7

Odpor zemniča R: 8.031 Ω

Celkový odpor sústavy: 5.068 Ω

