



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

SIMULACE MĚŘENÍ ODPORU UZEMNĚNÍ

SIMULATION OF EARTHING SYSTEM RESISTANCE MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Pirochta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Vyčítal, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Josef Pirochta

ID: 211435

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Simulace měření odporu uzemnění

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s metodami pro měření uzemnění.
2. Seznamte se s simulačními možnostmi programu Ansoft Maxwell.
3. Navrhněte vhodné kombinace modelů půdy a metod měření zemních odporů a tyto kombinace nasimulujte.
4. Proveďte porovnání a vyhodnocení získaných výsledků.

V rámci SP budou zpracovány první dva body zadání.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

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

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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

V této bakalářské práci byl zkoumán vliv různých modelů půdy a náhodných zemničů na výsledky měření odporu uzemnění při měření 4-pólovou metodou. Pro stanovení tohoto vlivu byly provedeny simulace v programu Ansys Electronics, ve kterém byly vytvořeny modely půdy (s lokální nehomogenitou, horizontálně dělená půda a půda rozdělená pod úhlem). Do těchto modelů byl umístěn měřený zemnič společně s měřicími elektrodami a byl stanoven jeho odpor jednak simulací měření a také vůči vzdálené zemi. Z rozdílu získaného odporu zemniče měřením a vůči vzdálené zemi pak byl stanoven vliv daného modelu půdy na přesnost měření.

Simulacemi bylo zjištěno, že ze všech zkoumaných variant může provádění měření v přítomnosti různých modelů půdy a náhodného zemniče vést k chybě měření do 7,2 %.

Klíčová slova

Měrná rezistivita, odpor půdy, elektrody, analýza, typy půd, 4 – pólová metoda 62%

Abstract

In this bachelor thesis, the effect of different soil models and random wire placed on the results of earth resistance measurements using the 4-pole method was investigated. To determine this influence, simulations were performed in Ansys Electronics software, in which different soil models (with local inhomogeneity, horizontally divided soil and soil divided at an angle) were created. In these models, the measured earth was placed together with the measured random wire and its resistance was determined by simulating the measurements and with respect to the distant ground. The effect of the different soil models on the accuracy of the measurements was determined from the differences in the resistance of the earth random wire obtained by measurement and with respect to the distant ground.

It was found by simulations that, of all the variants investigated, performing measurements in the presence of different soil models and a random wire can lead to a measurement error of up to 7,2 %.

Keywords

Resistivity, soil resistance, electrodes, analysis, soil types, 4-pole method 62%

Bibliografická citace

PIROCHTA, Josef. *Simulace měření odporu uzemnění* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142385>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Václav Vyčítal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Josef Pirochta*

VUT ID studenta: *211 435*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2021/22*

Téma závěrečné práce: *Simulace měření odporu uzemnění*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: 31. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Vyčítalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 31. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. SLOŽENÍ PŮDY	11
1.1 Vliv vlhkosti, teploty a chemického obsahu na odpor půdy	11
1.2 Typy půdy	12
1.2.1 Homogenní půda	13
1.2.2 Dvouvrstvá a vícevrstvá půda	14
1.2.3 Omezená nehomogenita	17
2. MĚŘENÍ REZISTIVITY	18
2.1 Wennerova metoda	18
2.2 Schlumbergerova metoda	20
3. UZEMNĚNÍ.....	21
3.1 Návrh zemniců	21
3.1.1 Výpočet zemniců	22
3.1.2 Uzemňovací elektrody	23
3.2 Návrhy soustavy zemniců	24
3.2.1 Vodorovné zemniče	24
3.2.2 Svislé tyčové zemniče	25
3.2.3 Proudová zatížitelnost zemniců	25
3.3 Měření odporu zemniců	26
3.3.1 Metoda potenciálového spádu	26
3.3.2 Proudová metoda	27
3.3.3 Odpor podpěrného bodu a závislost rezistivity na odporu podpěrného bodu	28
3.3.4 4 – pólová metoda	29
3.3.5 4 – pólová metoda 62 %	29
3.3.6 3 – pólová metoda	30
3.3.7 Pasivní metoda	31
4. SIMULACE UZEMNĚNÍ V ANSYS ELECTRONICS.....	32
4.1 Postup při modelování zemniců v AED	32
4.2 Volba materiálů	33
4.3 Postup modelování	34
5. SIMULACE MĚŘENÍ UZEMNĚNÍ.....	41
5.1 Homogenní půda s lokální nehomogenitou	42
5.2 Horizontálně dělená půda	47
5.3 Půda rozdělená pod úhlem 30°	50
5.4 Relativní chyby modelů	55
ZÁVĚR	56
LITERATURA.....	57
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	58
SEZNAM PŘÍLOH.....	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Vliv vlhkosti, teploty a soli na odpor půdy [1].	12
Obrázek 1.2 Hemisférické uzemňovací zařízení v homogenní půdě a příslušné rozložení potenciálu [2].	13
Obrázek 1.3 Výpočet zemního odporu zemních zařízení s jednoduchými konstrukcemi [2].	14
Obrázek 1.4 Profil n-vrstvé horizontální struktury půdy s vyznačeným rozložením elektrod Wennerova měření zdánlivé rezistivity půdy [2].	15
Obrázek 1.5 Hemisférické uzemňovací zařízení a jeho obrazy ve dvouvrstvé půdě [2].	15
Obrázek 1.6 Vertikální dvouvrstvá půda měřena Wennerovou metodou [9].	16
Obrázek 1.7 Vertikální dvouvrstvá půda a vzduch [9].	17
Obrázek 1.8 Příklady omezené nehomogenity půdy [8].	17
Obrázek 2.1 Schéma konfigurace obvodu pro měření rezistivity půdy Wennerovou metodou [5].	18
Obrázek 2.2 Měření rezistivity půdy Schlumbergovou metodou [5].	20
Obrázek 3.1 Polokulová elektroda v polokulovém průřezu [8].	22
Obrázek 3.2 Soustava vodorovných zemničů [8].	24
Obrázek 3.3 Svislé tyčové zemniče uspořádané do $n - \text{úhelníku}$ [8].	25
Obrázek 3.4 Rozmístění PE a CE elektrod, vzdálenost $l_{PE} = 0,625 \cdot l_{CE}$ [8].	26
Obrázek 3.5 Rozmístění PE a CE elektrod, vzdálenost $l_{PE} = l_{CE}$ [8].	27
Obrázek 3.6 Proudová metoda pro měření odporu uzemnění [8].	27
Obrázek 3.7 Závislost mezi zemním odporem a rezistivitou půdy v rozsahu $0-1000 \Omega \cdot m$ [5].	28
Obrázek 3.8 Závislost mezi zemním odporem a rezistivitou půdy v rozsahu $0-5000 \Omega \cdot m$ [5].	28
Obrázek 3.9 4 - pólová metoda [5].	29
Obrázek 3.10 4 - pólová metoda 62 % [5].	30
Obrázek 3.11 3 - pólová metoda [5].	30
Obrázek 3.12 Pasivní metoda [5].	31
Obrázek 4.1 Volba prostředí Maxwell 3D	32
Obrázek 4.2 Typ analýzy	33
Obrázek 4.3 Nastavení materiálu půdy s rezistivitou $300 \Omega \cdot m$	34
Obrázek 4.4 Seskupení podle materiálu	34
Obrázek 4.5 Model zemniče v Ansys Maxwell	35
Obrázek 4.6 Rozložení elektrod a náhodného zemniče	36
Obrázek 4.7 Funkce Split	36
Obrázek 4.8 Funkce Subtract	37
Obrázek 4.9 Dvouvrstvá horizontální půda	37
Obrázek 4.10 Vytvoření nových vektorových souřadnic	38
Obrázek 4.11 Půda pod úhlem	38
Obrázek 4.12 Region vakua	39
Obrázek 4.13 Solve Setup	40
Obrázek 4.14 Kontrola nastavení simulace v programu Ansys Maxwell	40
Obrázek 5.1 Model s lokální nehomogenitou	42
Obrázek 5.2 Model s lokální nehomogenitou a náhodným zemničem v blízkosti zemniče	42
Obrázek 5.3 Model horizontální půdy	47
Obrázek 5.4 Model půdy rozdělné pod úhlem	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Rozsah rezistivity půdy [3].	12
Tabulka 3.1 Zemniče a výpočet jejich odporů [8].	23
Tabulka 5.1 Odpor vůči vzdálené zemi	43
Tabulka 5.2 Měření homogenní půdy s lokální nehomogenitou pomocí konfigurace reálného měření zemniče	44
Tabulka 5.3 Měření homogenní půdy s lokální nehomogenitou pomocí konfigurace reálného měření zemniče, v jehož blízkosti se nachází náhodný zemnič.	45
Tabulka 5.4 Měření homogenní půdy s lokální nehomogenitou pomocí konfigurace reálného měření zemniče s náhodným zemničem před napěťovou elektrodou.	46
Tabulka 5.5 Měření homogenní půdy s lokální nehomogenitou pomocí konfigurace reálného měření zemniče s náhodným zemničem před proudovou elektrodou.	46
Tabulka 5.6 Odpor vůči vzdálené zemi	47
Tabulka 5.7 Měření horizontálně dělené půdy pomocí konfigurace reálného měření zemniče.	48
Tabulka 5.8 Měření horizontálně dělené půdy pomocí konfigurace reálného měření zemniče, v jehož blízkosti se nachází náhodný zemnič.	48
Tabulka 5.9 Měření horizontálně dělené půdy pomocí konfigurace reálného měření zemniče s náhodným zemničem před proudovou elektrodou.	49
Tabulka 5.10 Odpor vůči vzdálené zemi	51
Tabulka 5.11 Měření půdy pod úhlem pomocí konfigurace reálného měření zemniče	52
Tabulka 5.12 Měření půdy pod úhlem pomocí konfigurace reálného měření zemniče, v jehož blízkosti se nachází náhodný zemnič.	53
Tabulka 5.13 Měření půdy pod úhlem pomocí konfigurace reálného měření zemniče s náhodným zemničem před napěťovou elektrodou.	54
Tabulka 5.14 Měření půdy pod úhlem pomocí konfigurace reálného měření zemniče s náhodným zemničem před proudovou elektrodou.	54
Tabulka 5.15 Relativní chyby	55

ÚVOD

Mezi základní úkony elektroinženýrů patří návrh a měření zemničů. Pro měření lze používat různé typy měřících metod jako například zatlučenou tyč, či 3, 4 pólovou metodu 62 % nebo potenciálního spádu. Jedním z úskalí těchto metod může být případ kdy je měření prováděno v blízkosti náhodného zemniče nebo v přítomnosti různého složení půdy.

Pro simulace se využívá program Ansys Electronics, který umožňuje vytváření různých modelů půd. Modely jsou děleny na: s lokální nehomogenitou, horizontální vícevrstvou půdou a dvouvrstvou půdou rozdělenou pod úhlem 30 stupňů od středu modelu. Tyto modely půd jsou v simulaci měřeny v rovnoběžném směru měřících elektrod a kolmém směru elektrod vůči sobě.

Analýzou modelů v programu jsou stanoveny měřené napětí na napěťové elektrodě a napětí vůči vzdálené zemi při poruše. Ze získaných hodnot je stanoven odpor zemniče. Následně se porovnávají výsledky měření odporu pomocí elektrod a měření vůči vzdálené zemi a stanovují se chyby způsobené metodou měření, nehomogenitou půdy a náhodným zemničem.

1. SLOŽENÍ PŮDY

Půda je komplexní systém skládající se z pevných, kapalných a plyných složek. Pevná část normální půdy obvykle zahrnuje minerály a organické látky, kapalnou částí se rozumí vodní roztok a plynou částí je vzduch mezi pevnými částicemi. Pevná složka tvoří základní strukturu půdy, kapalná a plyná složka vyplňují dutiny ve struktuře. V případě zmrzlé půdy, je přítomen nový druh pevného materiálu, led [2].

1.1 Vliv vlhkosti, teploty a chemického obsahu na odpor půdy

Elektrické vedení v půdě je v podstatě elektrolytické. Z tohoto důvodu odpor u většiny půd stoupá, kdykoli obsah vlhkosti tvoří méně než 15% hmotnosti půdy. Množství vlhkosti dále závisí na velikosti zrn půdy, kompaktnosti a proměnlivosti velikosti zrn. Nicméně, jak je ukázáno na křivce 2 (Obrázek 1.1), je měrný odpor ovlivněn, jakmile obsah vlhkosti překročí přibližně 22 % [1].

Vodivost půdy je silně dána obsahem vody a jejím skupenstvím, v kterém se nachází. Podle obsahu vody v půdě, vzdálenosti pevných částic a elektrostatické síly přijaté z pevných částic může být půda rozdělena do následujících typů [2]:

Strongly Associated Water: V blízkosti povrchu půdních částic se molekuly vody těsně těsní a nemohou se volně pohybovat kvůli velké intenzitě elektrostatického pole.

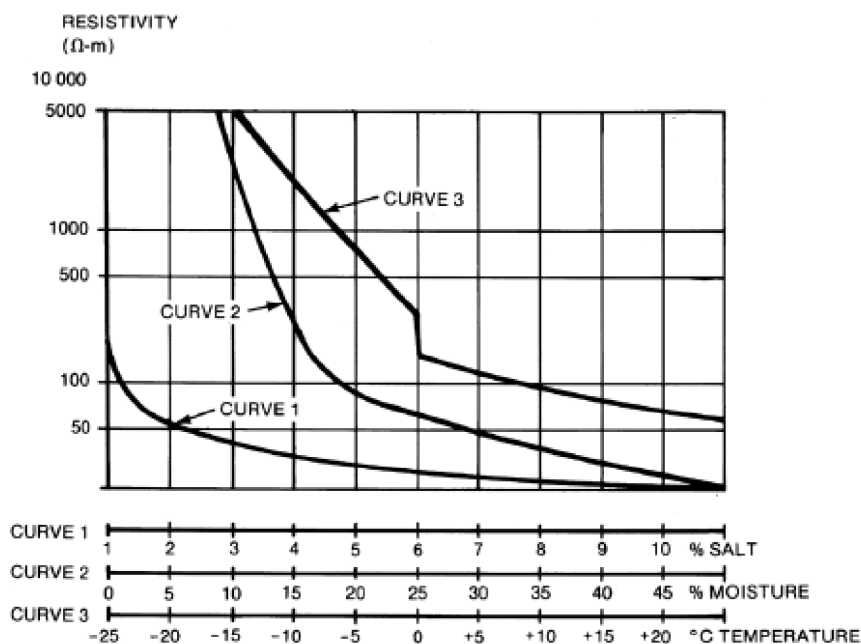
Weakly Associated Water: Intenzita elektrostatického pole se snížila, takže molekuly vody jsou aktivnější, ale stále je tento typ vody ovlivňován především elektrostatickým polem.

Capillary Water: Jak se vzdálenost mezi částicemi půdy a molekulami vody zvětšuje, jsou molekuly vody ovlivňovány především gravitací. Přestože elektrostatické pole stále hraje určitou roli, už nemá primární funkci.

Gravity Water: Jak se vzdálenost mezi částicemi půdy a molekulami vody stále zvětšuje, účinek elektrostatického pole se stává pro molekuly vody zanedbatelný a molekuly vody jsou ovládány pouze gravitací.

Vliv teploty na odpor půdy je pro teploty nad bodem mrazu téměř zanedbatelný. Při teplotě 0 °C začne voda v půdě mrznout a odpor se rychle zvyšuje. Křivka 3 (Obrázek 1.1) ukazuje variace pro písčitohlinitou půdu obsahující 15,2 % vlhkosti.

Složení a množství rozpustných solí, kyselin nebo zásad přítomných v půdě může značně ovlivnit její odpor. Křivka 1 (Obrázek 1.1) ilustruje typický účinek solí (chloridu sodného) na měrný odpor, při půdě obsahující 30 % vlhkosti [1].



Obrázek 1.1 Vliv vlhkosti, teploty a soli na odpor půdy [1].

1.2 Typy půdy

Používanými modely odporu půdy jsou homogenní model půdy a dvouvrstvý model půdy. Ve skutečných případech se homogenní půda vyskytuje jen zřídka a výsledek měření, který obvykle získáme, je ekvivalentní měrný odpor nebo zdánlivý měrný odpor. Dvouvrstvé půdní modely jsou často dobrou aproximací mnoha půdních struktur, zatímco vícevrstvé půdní modely lze použít pro složitější půdní podmínky. Interpretace měření měrného odporu půdy může být provedena buď ručně nebo pomocí technik počítačové analýzy [2].

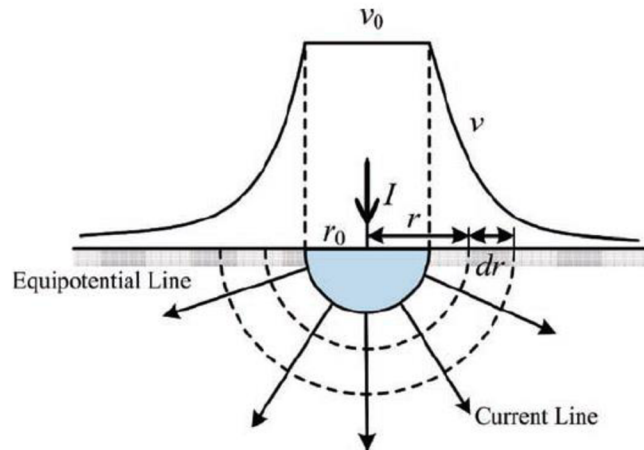
Rezistivita půdy se běžně pohybuje v rozmezí od 20 do 3000 Ωm. Ale například v případě žuly může rezistivita dosahovat až 50000 Ωm viz. Tabulka 1.1.

Tabulka 1.1 Rozsah rezistivity půdy [3].

Typ půdy	Rozsah hodnot ρ (Ωm)
Močál	5-40
Hlína, jíl, humus	20-200
Písek	200-2500
Zvětralá skála	do 1000
Štěrkopísek	2000-3000
Pískovec	2000-3000
Moréna	do 30000
Žula	do 50000

1.2.1 Homogenní půda

Homogenní půda je půda o stejném měrném odporu ρ , tudíž proudová hustota je radiálně se shodující v celém polokulovém uzemňovacím zařízení. Odpor uzemnění je poměr mezi potenciálem uzemňovacího zařízení a proudem tekoucím do země přes uzemňovací zařízení, který souvisí s vlastnostmi půdy a tvarem a velikostí uzemňovacího zařízení [2].



Obrázek 1.2 Hemisférické uzemňovací zařízení v homogenní půdě a příslušné rozložení potenciálu [2].

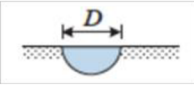
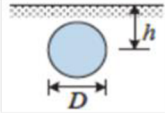
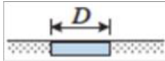
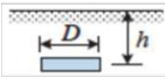
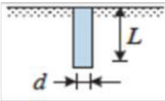
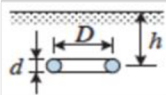
Potenciál bodu se vzdáleností r ke středu polokulového uzemňovacího zařízení, viz Obrázek 1.2 lze vypočítat pomocí potenciálového vzorce bodového zdroje proudu, který je [2]:

$$v = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1)$$

Celkový nárůst potenciálu zemniče v_0 lze vypočítat pomocí rovnice (2), když $r = r_0$, kde r_0 odpovídá poloměru polokoule [2]:

$$v_0 = \frac{I\rho}{2\pi r_0} \quad (2)$$

Odpor R uzemňovacího zařízení lze vypočítat, viz Obrázek 1.3, pro různé tvary a velikosti homogenní půdy.

typ uzemnění	tvar a velikost uzemnění	Vzorec pro výpočet odporu uzemnění
Polokoule		$R = \frac{\rho}{\pi D}$
Koule umístěná v zemi v hloubce h		$R = \frac{\rho}{\pi D} \left(0,5 + \frac{D}{8h} \right) \quad (D < h)$
Kruhová plochá deska		$R = \frac{\rho}{2D}$
Kruhová plochá deska umístěná v zemi v hloubce h		$R = \frac{\rho}{2D} \left(0,5 + \frac{D}{4\pi h} \right) \quad (D < 2h)$
svislá zemnicí tyč		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right) \quad (d \ll L)$
uzemňovací elektrody ve tvaru prstence		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{16D^2}{hd}$

Obrázek 1.3 Výpočet zemního odporu zemnicích zařízení s jednoduchými konstrukcemi [2].

1.2.2 Dvouvrstvá a vícevrstvá půda

Model dvouvrstvé nebo vícevrstvé půdy je mnohem přesnější než model homogenní půdy. Uzemňovací systém ve dvouvrstvém půdním prostředí se chová odlišně ve srovnání se stejným systémem v homogenní půdě.

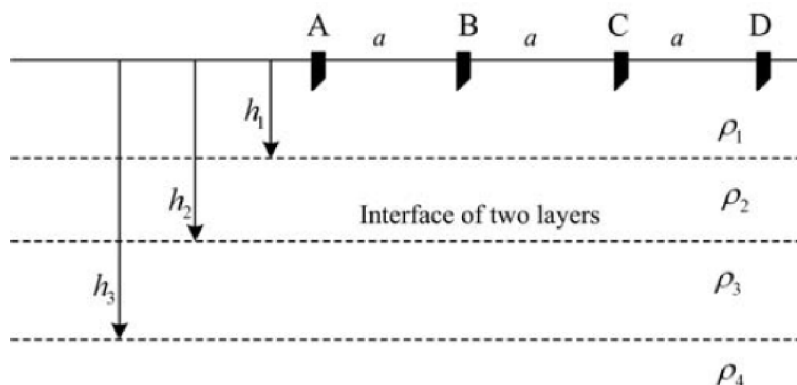
Půda může být obvykle ekvivalentní model dvou nebo více horizontálních vrstev nebo vertikálních vrstev. Výpočtem aktuálního pole můžeme získat potenciál v měřeném bodě. Potenciál uzemňovacího zařízení je obvykle představován středním potenciálem nebo průměrným potenciálem zemnicího vodiče, podle definice zemního odporu. Rozložení potenciálu v nehomogenní půdě lze získat zrcadlovou metodou a řešením Laplaceovy rovnice.

Vícevrstvý model se používá, pokud ekvivalentní dvouvrstvý půdní model není proveditelný. Techniky pro interpretaci vysoce nerovnoměrného odporu půdy vyžadují použití počítačových programů nebo grafických metod [1].

Horizontální vrstvy půdy

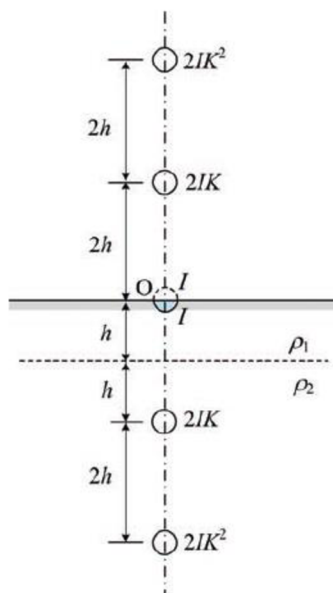
Obecně platí, že pro uzemňovací systém ve dvouvrstvé nebo vícevrstvé půdě, viz Obrázek 1.4, kdy ρ_1 je menší než ρ_2 (měrný odpor půdy horní vrstvy je menší než odpor půdy spodní vrstvy) obecně platí, že proudová hustota je vyšší ve vodičích na vnějších okrajích zemnicí mřížky. Ve dvouvrstvé zemině s ρ_1 větším než ρ_2 (zemina v horní vrstvě je odolnější než zemina ve spodní vrstvě, negativní faktor odrazu) je proudová hustota

rovnoměrnejší ve všech vodičích zemnicího systému. To je způsobeno tendencí proudu mřížky směřovat dolů do vrstvy s nižším měrným odporem, spíše než nahoru a ven do odolnější horní vrstvy [2].



Obrázek 1.4 Profil n-vrstvé horizontální struktury půdy s vyznačeným rozložením elektrod Wennerova měření zdánlivé rezistivity půdy [2].

Obrázek 1.5 ukazuje polokulové uzemňovací zařízení v horizontálním směru o poloměru r uložené ve dvouvrstvé zemině. Odpor zeminy vrchní vrstvy o tloušťce h je ρ_1 a zeminy spodní vrstvy ρ_2 [2].



Obrázek 1.5 Hemisférické uzemňovací zařízení a jeho obrazy ve dvouvrstvé půdě [2].

Pokud k vyjádření potenciálu polokulového vodiče použijeme potenciál středního bodu, lze pomocí principu superpozice odvodit následující vzorec [2]:

$$V = \frac{\rho_1 I}{2\pi r} \left(1 + 2r \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{2nh}\right) \quad (3)$$

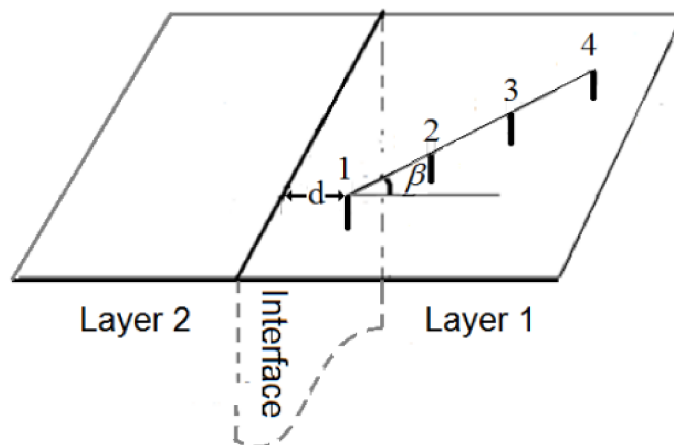
kde $K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$, viz Obrázek 1.5. Potom lze zemní odpor R polokulového uzemňovacího zařízení uloženého ve dvouvrstvé zemině vypočítat podle [2]:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho_1}{2\pi r} \left(1 + \frac{r}{h} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{n}\right) = \frac{\rho_1}{2\pi r} \left[1 - \frac{r}{h} \ln(1 - K)\right] \quad (4)$$

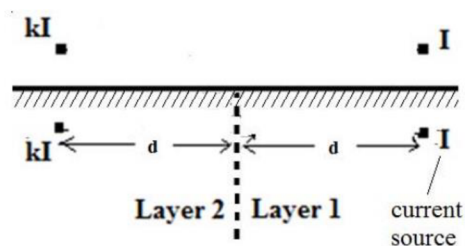
kde první člen je odpor uzemnění v homogenní půdě s měrným odporem ρ_1 , což je odpor uzemnění při $\rho_1 = \rho_2$, $K = 0$; druhá část je dodatečný uzemňovací odpor ΔR vnesený spodní vrstvou zeminy [2].

Vertikální vrstvy půdy

Obrázek 1.6 znázorňuje dvouvrstvý model půdy sestávající ze dvou vertikálních vrstev s různými rezistivitami ρ_1 a ρ_2 . V první vrstvě jsou uloženy čtyři elektrody pro měření Wennerovou metodou, viz Obrázek 1.6 Vertikální dvouvrstvá půda měřena Wennerovou metodou [9]. První elektroda je vzdálena od druhé vrstvy o vzdálenost d . Přímka, na které leží čtyři elektrody, svírá úhel β s kolmým směrem k rozhraní mezi oběma vrstvami. Jak znázorňuje Obrázek 1.7, zdroj proudu a jeho zrcadlové obrazy jsou umístěny tak, aby byly splněny okrajové podmínky mezi vzduchem a svislou dvouvrstvou půdou [9].



Obrázek 1.6 Vertikální dvouvrstvá půda měřena Wennerovou metodou [9].



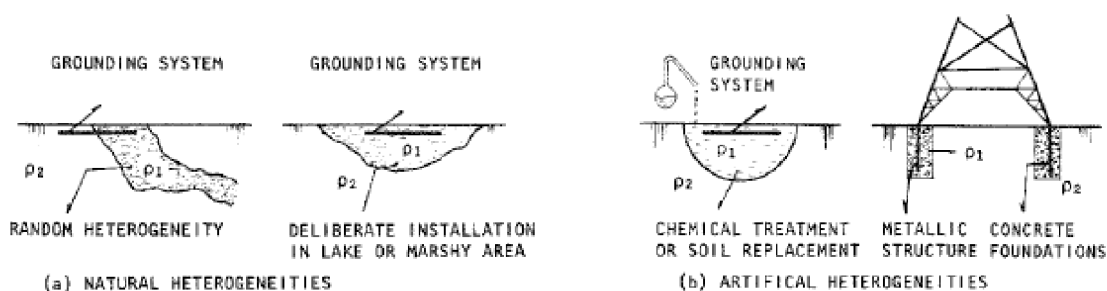
Obrázek 1.7 Vertikální dvouvrstvá půda a vzduch [9].

1.2.3 Omezená nehomogenita

Pozornost je nyní zaměřena na situaci, kdy je uzemňovací systém (nebo jeden z jeho prvků) zapuštěn do zeminy s měrným odporem ρ_1 odlišným od průměrného měrného odporu ρ_2 v zemině.

Tato situace je v praxi zcela běžná v důsledku přírodních nebo umělých faktorů. Kromě případu, kdy je zemnicí systém instalován v malém lokalizovaném objemu půdy s různým odporem, může být uzemňovací systém záměrně instalován v malých jezerech nebo bažinatých oblastech, aby se snížil jeho zemní odpor. Dalším příkladem je situace, kdy je měrný odpor malého objemu zeminy kolem zemnicí elektrody snížen chemickým ošetřením nebo nahrazením přírodní zeminy materiálem s nízkým měrným odporem.

Dále existují případy, kdy jsou kovové vodiče připojené k zemnicímu systému, zalité v betonu, který slouží jako základ konstrukce (patky konstrukce, nosné konstrukce energetických zařízení atd.). Tyto situace znázorňuje Obrázek 1.8



Obrázek 1.8 Příklady omezené nehomogenity půdy [8].

Důkladná analýza výkonu uzemňovacího systému zcela nebo částečně zapuštěného v relativně malém objemu půdy, jehož měrný odpor ρ_1 je odlišný od hlavního zemního měrného odporu ρ_2 , je možná pouze pro jednoduché zemnicí systémy a určité konfigurace heterogenity půdy. Když přesné řešení není proveditelné, je možné získat informace pomocí aproximace.

2. MĚŘENÍ REZISTIVITY

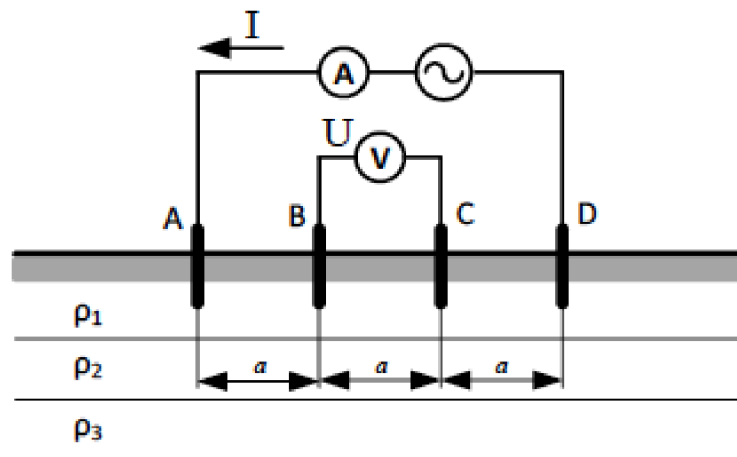
Znalost zemního odporu může být cenná při zjišťování složení zeminy, jako je například obsah vlhkosti, zda obsahuje ropu, rudy s vysokou vodivostí atd. Měření se nejčastěji provádějí v hloubce h , která se shoduje s hloubkou uložení zemniců.

Geoelektrická měření jsou měření rezistivity půdy s využitím nejčastěji čtyř elektrod. Pro různé uspořádání elektrod využíváme Wennerovu nebo Schlumbergerovu metodu. Z těchto metod se častěji používá Wennerova metoda.

2.1 Wennerova metoda

Wennerova metoda využívá čtyř elektrod, které jsou umístěny částečně v zemi v řadě s rovnoměrným rozstupem a , viz Obrázek 2.1. Na vnitřních elektrodách se měří napětí U a k vnějším elektrodám se připojuje zdroj střídavého proudu. Při měření provozních vedení by kmitočet zdroje neměl být 50 Hz, to platí i pro přístroje měřící napětí, které mají selektivní filtr pro měření pouze příslušného kmitočtu. V případě homogenosti půdy a ideálních bodových elektrod lze odvodit z teorie elektromagnetického pole, že rezistivita půdy je:

$$\rho = 2\pi a \cdot \frac{U}{I} \quad (5)$$



Obrázek 2.1 Schéma konfigurace obvodu pro měření rezistivity půdy Wennerovou metodou [5].

Vzdálenost mezi elektrodami závisí na hloubkách vrstev půdy, měření se provádí opakovaně s elektrodami umístěnými kolmo k ose vedení, pro jednotlivá měření se

používá různé a . Tím se pokryje rezistivita půdy v různých hloubkách. Výslednou rezistivitu lze spočítat ze vztahu:

$$\rho = \frac{3}{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3}} \quad (6)$$

Pro prvotní měření se volí rozteč 1 m, 3 m, 5 m, 10 m a více (dle návodu přístroje). U periodických a kontrolních měření je možné využít jedno dílčí měření pro rozteč elektrod minimálně 3 m k určení rezistivity půdy.

Při vícevrstevném měření půdy se mohou rezistivity ρ_1, ρ_2 a ρ_3 výrazně lišit. Pro ověření, zda se jedná a nahodilou chybu nebo různá půdní složení, lze využít měření rezistivity ve dvou kolmých směrech, které by potvrdilo původní změřené hodnoty. To znamená, že se provede nové měření, kde uspořádání elektrod je kolmé na to původní.

Elektrody se umísťují minimálně na vzdálenost rozteče a od jakéhokoliv objektu v zemi [5].

V případě měření rezistivity ve vertikální půdě pod úhlem β , kde β je úhel určující směr elektrod vůči pomyslné čáře oddělující vrstvy ρ_1 a ρ_2 , viz Obrázek 1.6, platí:

$$\rho = a\rho_1 \left(\frac{1}{a} + \frac{k}{\sqrt{4d^2 + 4da \cos \beta + a^2}} + \frac{k}{\sqrt{4(d + 3a \cos \beta)(d + 2a \cos \beta) + a^2}} - \frac{k}{\sqrt{4a^2 + 8da \cos \beta + 4a^2}} - \frac{k}{\sqrt{4(d + 3a \cos \beta)(d + a \cos \beta) + 4a^2}} \right) \quad (7)$$

Pokud se $\beta = 0^\circ$ platí

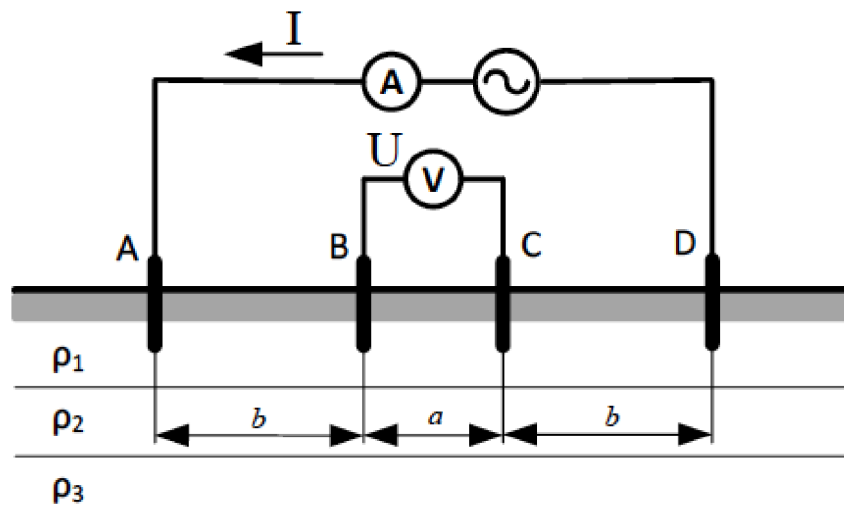
$$\rho = a\rho_1 \left(\frac{1}{a} + \frac{k}{\sqrt{4d^2 + 4da + a^2}} + \frac{k}{2d + 5a} - \frac{k}{\sqrt{4d^2 + 8da + 4a^2}} - \frac{k}{2d + 4a} \right), \quad (8)$$

pro $\beta = 90^\circ$ platí:

$$\rho = a\rho_1 \left(\frac{1}{a} + \frac{2k}{\sqrt{4d^2 + a^2}} - \frac{2k}{\sqrt{4d^2 + 4a^2}} \right). \quad (9)$$

2.2 Schlumbergerova metoda

Ve srovnání s Wennerovou metodou je měření rychlejší, ale výpočet naměřené rezistivity je složitější. Z tohoto důvodu se metoda používá, pokud máme přístroj, který provádí vyhodnocení měření automaticky. Princip metody spočívá v zachování rozteče $a = 1$ m pro vnitřní elektrody a mění se pouze rozteč b pro elektrody vnější [5].



Obrázek 2.2 Měření rezistivity půdy Schlumbergovou metodou [5].

3. UZEMNĚNÍ

Celá tato kapitola pojednává o uzemnění podle zdroje [8]. Uzemněním rozumíme realizaci nezbytných spojení pro dané místo zařízení, přístroje nebo sítě tak, aby bylo udržováno na potencionálu země.

Uzemnění slouží k ochraně před úrazem elektrickým proudem a k ochraně elektrických zařízení a strojů před působením velkých proudů a přepětí. Umožňuje svést atmosférické proudy a udržovat určitou část elektrického obvodu na potencionálu země.

Typy uzemnění:

Ochranné uzemnění – neživé části elektrických zařízení jsou spojeny se zemí, čímž předcházíme vzniku nebezpečného napětí na daných částech.

Pracovní uzemnění – se provádí za účelem ochrany elektrických přístrojů, zařízení a sítí (např. uzemnění uzlu transformátoru, svodičů napětí). Jedná se o přechodné nebo trvalé spojení se zemí, které zabrání nežádoucímu vzrůstu napětí nebo přepětí.

Jedno uzemnění může fungovat dohromady jako ochranné i pracovní, nebo lze každé uzemnění zapojit zvlášť.

3.1 Návrh zemničů

Parametry pro návrh uzemnění:

- Požadovaný zemní odpor
- Mechanická a korozní odolnost
- Přípustné dotykové a krokové napětí
- Přípustné napětí na uzemňovací soustavě
- Proudová zatížitelnost

Typy zemničů:

a) Náhodné zemniče

- Výztužná ocel v základech
- Podzemní části ocelových konstrukcí
- Celokovové stožáry v běžné trase s odporem půdy $150 \Omega \text{ m}$

b) Strojené zemniče

- Základové
- Zemní síť
- Tyčové a hloubkové
- Zemniče pro vyrovnání potenciálu

3.1.1 Výpočet zemničů

Pro výpočty parametrů zemniče považujeme rezistivitu půdy ρ za konstantu, což odpovídá homogennímu půdnímu prostředí. Pokud se jedná o heterogenní prostředí lze využít horizontální vrstvy s různými hodnotami rezistivity.

K výpočtu parametrů využijeme proudového pole polokulové elektrody na povrchu země (Obrázek 3.1). Proudovou hustotu σ spočítáme z proudu I (A), který odtéká z povrchu polokoule do země ve vzdálenosti x (m) od středu polokoule

$$\sigma = \frac{I}{2\pi x^2}. \quad (13)$$

Intenzita elektrického pole E (V/m) ve vzdálenosti x (m) při rezistivitě ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) je

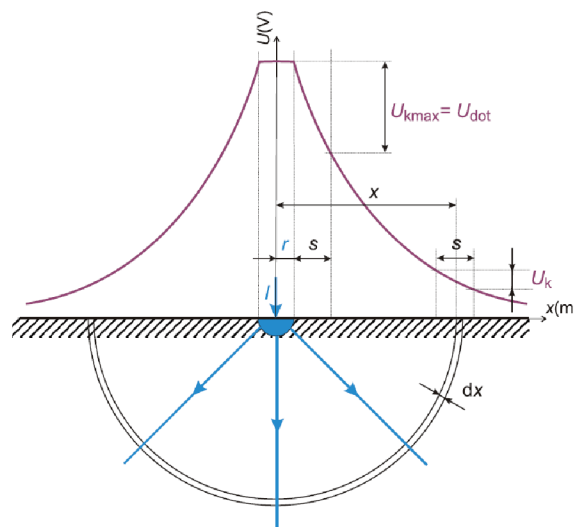
$$E = \rho\sigma = \frac{\rho I}{2\pi x^2}, \quad (14)$$

dále pak napětí U (V) mezi poloměrem r (m) a bodem o vzdálenosti x

$$U = \int_r^x E dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_r^x \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - 0 \right), \quad (15)$$

a celkové napětí na zemniči U_0 (V) je

$$U_0 = \int_r^\infty E dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - 0 \right) = \frac{\rho I}{2\pi r}. \quad (16)$$



Obrázek 3.1 Polokulová elektroda v polokulovém průřezu [8].

Zemní odpor R (Ω) pro polokulovou elektrodu je

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi r}. \quad (17)$$

Hodnota krokového napětí U_k (V) (rozdíl napětí mezi nohama rozkročeného člověka) se odvíjí od vzdálenosti x (m) od středu elektrody a délky kroku s (m)

$$U_k = \int_{x-\frac{s}{2}}^{x+\frac{s}{2}} E dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_{x-\frac{s}{2}}^{x+\frac{s}{2}} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{x-\frac{s}{2}} - \frac{1}{x+\frac{s}{2}} \right). \quad (18)$$

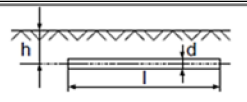
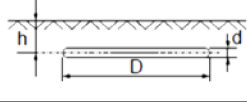
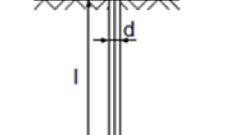
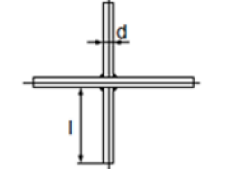
Ve vzdálenosti $x=r+s/2$ od středu polokulové elektrody se nachází maximální krokové napětí $U_{k\max}$ (V), které se při délce kroku 1 m rovná dotykovému napětí

$$U_{k\max} = U_{dot} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{s}{r^2 + sr}. \quad (19)$$

3.1.2 Uzemňovací elektrody

Za uzemňovací elektrody považujeme kovové pásy, tyče, dráty a trubky umístěné v hloubce h (m). Hloubka uložení pod povrchem země h je mnohem menší než délka elektrod l . Pro výpočty v praxi využíváme zjednodušené vzorce, viz Tabulka 3.1.

Tabulka 3.1 Zemniče a výpočet jejich odporů [8].

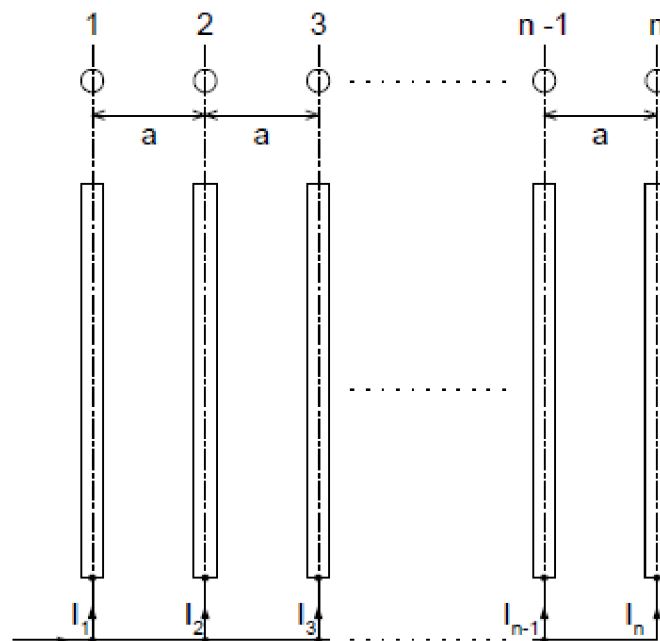
Typ zemniče	Uložení	Zemní odpor [Ω] (přesnější vzorec)	Podmínky použití	Zemní odpor [Ω] (přibližný vzorec)	Podmínky použití
Páskový nebo drátový vodič		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{l}{2h} \right)$	$l \gg d$ $h \ll l/4$	$R = 2 \frac{\rho}{l}$	$l \gg d$ $h \ll l/4$ $l = 10 \div 50$ m
Páskový nebo drátový vodič v kruhu		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{\pi D}{2h} \right)$	$D \gg d$ $h \ll D/4$	$R = 2,1 \frac{\rho}{l}$	$D \gg d$ $h \ll 2/d$ $D/h \gg 10$
Tyč		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$l \gg d/2$	$R = 0,9 \frac{\rho}{l}$	$l \gg d/2$ $l = 1 \div 3$ m
Páskový nebo drátový vodič paprskový		$R = \frac{\rho}{4\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + 1 \right)$	$l \gg d$	$R = 0,7 \frac{\rho}{l}$	$l \gg d$ $l \ll 30$ m

3.2 Návrhy soustavy zemničů

3.2.1 Vodorovné zemniče

Při uzemňování větších rozvodných objektů se využívají soustavy zemničů. Pro vytvoření uzemňovací soustavy lze použít vodorovné, rovnoběžně uložené a na obou koncích propojené zemničí vodiče. Při přivedení proudu I (A) do vodorovné uzemňovací soustavy o n tyčích kruhového poloměru r_0 , délce l a umístěných ve vzdálenosti a , se proud I rozdělí na jednotlivé proudy I_1, I_2, \dots, I_n . Předpokládáme-li konstantní vodivost půdy a přivedení celkového proudu I do středu soustavy, za těchto podmínek se jednotlivé proudy rozdělí symetricky ke středu soustavy.

Pro potenciál každého zemniče se musí zjistit jeho vlastní potenciál a potenciál vyvolaný proudy odtékajícími z ostatních zemničů.



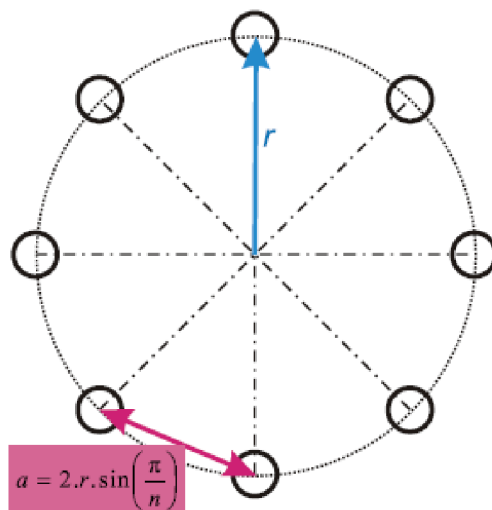
Obrázek 3.2 Soustava vodorovných zemničů [8].

Pro velké mřížové zemní sítě používáme pro výpočet zemního odporu zjednodušený vztah, kde R je rovno součtu odporu plné desky ve tvaru kruhu o průměru D a odchylky odporu v důsledku rozdílné hustoty sítě, kde l je celková délka vodičů sítě. Tato odchylka se pro nekonečně hustou síť blíží k nule a zůstane vztah pro zemní odpor plné desky.

$$R = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{l} \quad (20)$$

3.2.2 Svislé tyčové zemniče

Pro menší rozvodny se pro zemnění často používají propojené svislé tyčové elektrody. Zemniče jsou zaraženy do země ve tvaru n – úhelníku (Obrázek 3.3), ukládají se v menších vzdálenostech a navzájem se ovlivňují, což zvyšuje celkový odpor zapojení.



Obrázek 3.3 Svislé tyčové zemniče uspořádané do n – úhelníku [8].

Pro zemní odpory R_z paralelně spojených tyčových zemničů využijeme vztah

$$R_z = \frac{1}{\frac{\eta_1 \eta_2 n}{R_1} + \frac{1}{R_0}}, \quad (21)$$

kde η_l je činitel trubkových nebo tyčových zemničů. Dále zemní odpor jednoho tyčového zemniče určíme ze vztahu

$$R_1 = 0,9 \frac{\rho}{l}, \quad (22)$$

a pro odpor spojovacího pásku zemniče platí vztah

$$R_0 = 2 \frac{\rho}{l}. \quad (23)$$

3.2.3 Proudová zatížitelnost zemničů

Zatížitelnost zemničů je závislá na rezistivitě půdy a na časovém intervalu průchodu proudu zemničem. Rezistivita půdy se odvíjí od typu půdy její vlhkosti a vodivosti, viz Kapitola 1.1. Pokud se zemnič přetíží proudem, půda v jeho okolí se zahřívá a vysušuje, čímž se zvyšuje její rezistivita a napětí. Úplný průraz půdy nastává, pokud intenzita pole

překročí průrazný gradient půdy a zkratuje vrstvu zeminy v okolí zemniče. Rezistivita v místě vodiče se sníží a tím se sníží i celkový zemní odpor vodiče.

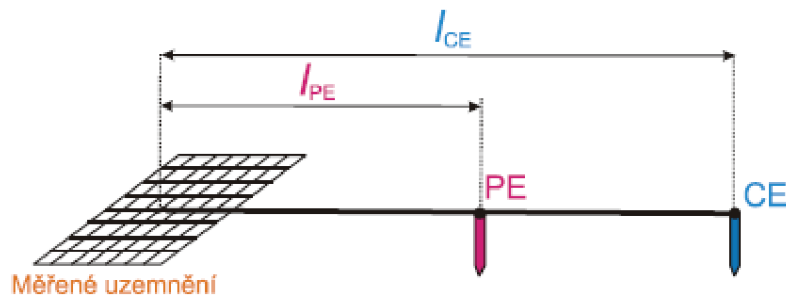
Maximální zatížitelnost zemničů v betonu pro hustotu nejvyššího rázového proudu je 50 kA/m^2 . Přípustné hodnoty proudového zatížení se udávají v závislosti na rezistivitě zeminy obklopující beton a na časovém intervalu průchodu proudu. Při překročení dovolené proudové hustoty se může beton poškodit. Naopak u vodičů v půdě se upřednostňuje vysoká hustota rázového proudu, která způsobí zvýšení intenzity pole a tím překonání přechodových odporů.

3.3 Měření odporu zemničů

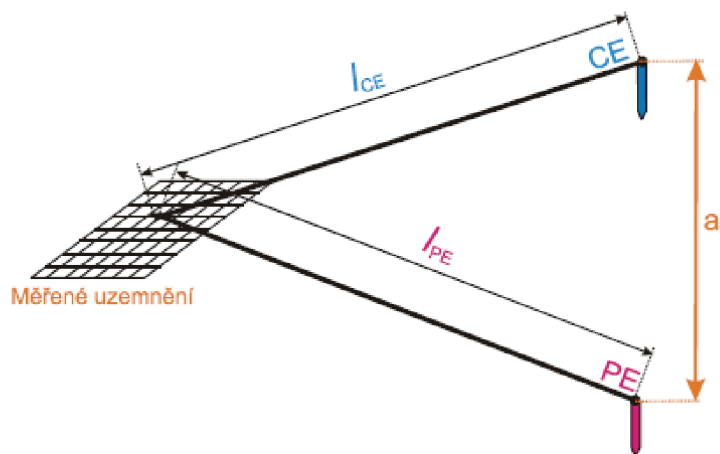
3.3.1 Metoda potenciálového spádu

Metodu používáme ke změření odporu zemničů se zemním odporem od $0,5 \Omega$. Metoda je vhodná pro tyčové a paprskové zemniče.

Vliv na přesnost měření má vzdálenost měřeného uzemnění a proudové CE elektrody, kterou u jednoduchých zemničů (do 40 m) nastavujeme alespoň na 40 m kolmo na zemnič. Pro zemničí systémy (zemničí síť, složitý zemnič) musí tato vzdálenost být nejméně čtyřnásobek uhlopříčky nebo největšího rozměru zemniče. Dále je přesnost měření ovlivněna rozmístěním potenciálové elektrody PE a proudové elektrody CE (Obrázek 3.4, Obrázek 3.5).



Obrázek 3.4 Rozmístění PE a CE elektrod, vzdálenost $l_{PE} = 0,625 \cdot l_{CE}$ [8].

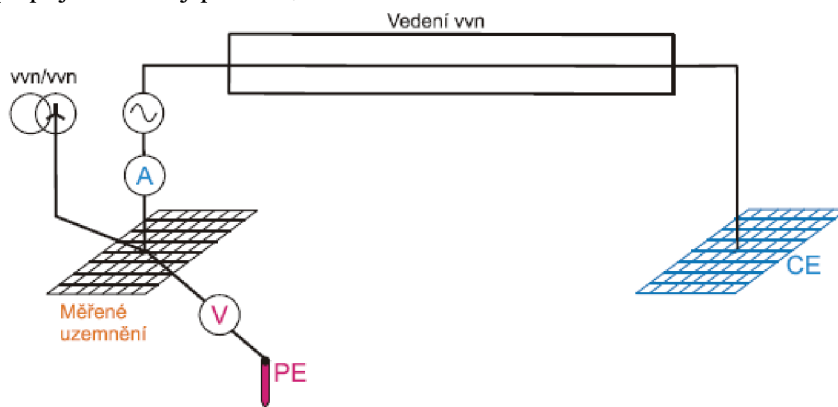


Obrázek 3.5 Rozmístění PE a CE elektrod, vzdálenost $l_{PE} = l_{CE}$ [8].

Abychom odstranili chyby vzniklé vlastní a vzájemnou indukčností přívodů, pokládáme elektrody ve vzdálenosti od sebe nejméně 60 cm pro souběh cca 600 m. Měřicí elektrody se nesmí nacházet v možném poli dalších zemničů.

3.3.2 Proudová metoda

Pro měření rozsáhlých systému používáme proudovou metodu, kde zjišťujeme úbytek napětí na zemničích vyvolaný vnuceným zkušebním proudem. Mezi elektrodu a měřené uzemnění připojíme zdroj proudu, viz Obrázek 3.6.



Obrázek 3.6 Proudová metoda pro měření odporu uzemnění [8].

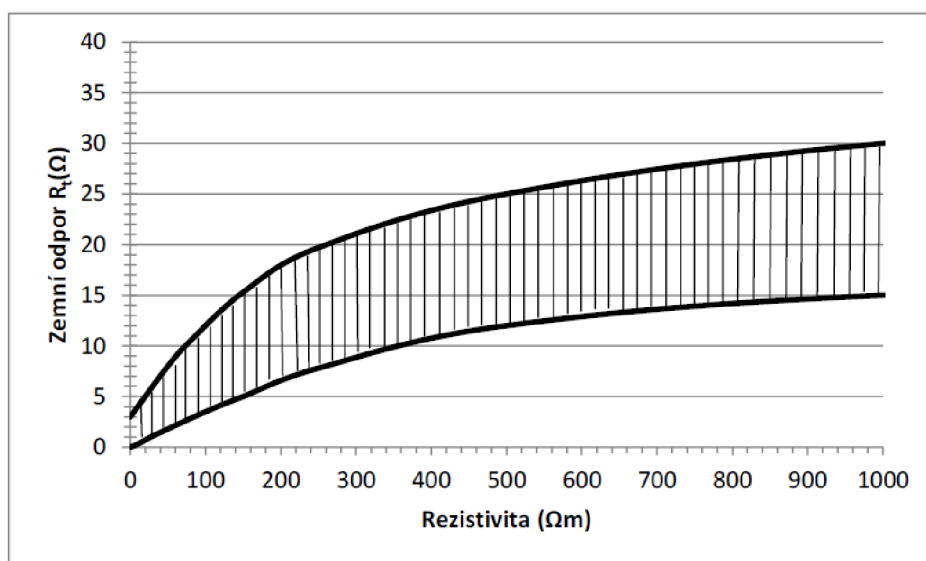
K měření napětí je nutné použít voltmetr s vysokým vnitřním odporem. Po odečtení hodnot z ampérmetru proud I_m a z voltmetru napětí U_m , lze vypočítat zemní odpor ze vztahu (24), kde r_{CE} je redukční činitel vedení použitý k elektrodě CE.

$$R_z = \frac{U_m}{r_{CE} I_m} \quad (24)$$

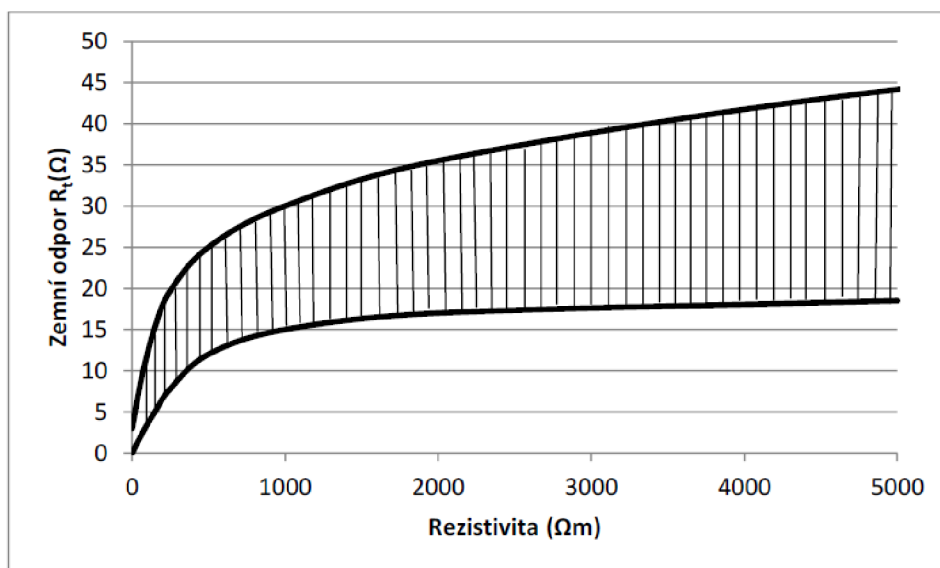
3.3.3 Odpor podpěrného bodu a závislost rezistivity na odporu podpěrného bodu

Do země se přivádí proud z měřicího zdroje a pomocí sondy se měří proud procházející zemničem a napětí zemniče proti zemi. Pokud se měření provádí za provozu vedení používá se zdroj napětí s jiným kmitočtem než 50 Hz. Vhodné jsou zdroje s regulovatelným kmitočtem, aby byla zajištěna kmitočtově ustálená hodnota zemního odporu.

Vyšrafovaná plocha (Obrázek 3.7 a Obrázek 3.8) ukazuje závislost zemního odporu R_z a rezistivity půdy. Pokud jsou hodnoty rezistivity vyšší, pak hodnotu zemního odporu R_z snižují strojené zemniče [5].



Obrázek 3.7 Závislost mezi zemním odporem a rezistivitou půdy v rozsahu 0-1000 $\Omega\cdot\text{m}$ [5].



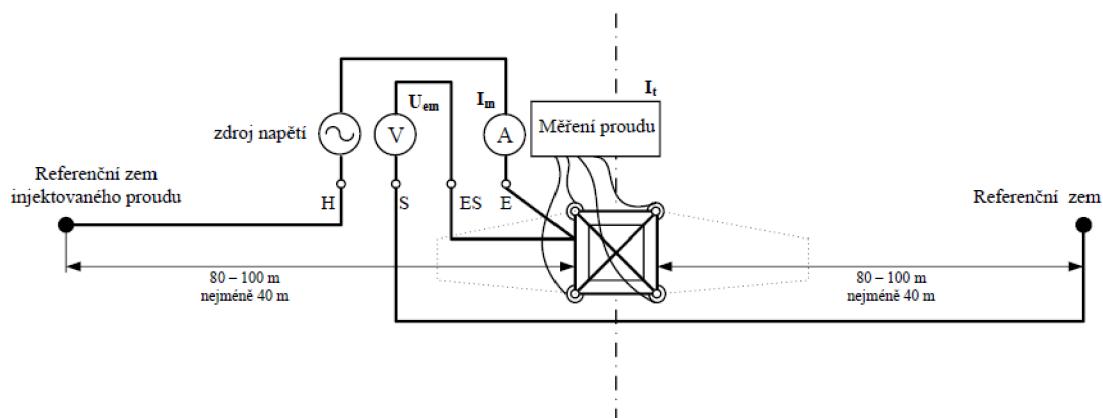
Obrázek 3.8 Závislost mezi zemním odporem a rezistivitou půdy v rozsahu 0-5000 $\Omega\cdot\text{m}$ [5].

3.3.4 4 – pólová metoda

Je základní metodou pro měření zemního odporu pomocí proudových sond (např. cívek). Proud o kmitočtu 15–5000 Hz se injektuje ze zkušebního zdroje napětí do proudového obvodu, který se skládá z kontaktního bodu na stožáru E, země, konstrukce zemniče a vzdálené sondy H. Zemničem prochází proud I_t , který vytvoří napěťový spád U_{em} mezi vzdálenou referenční zemí S a uzemněním E (ES). Z naměřeného U_{em} a I_t lze spočítat zemní odpor R_t podle vztahu:

$$R_t = \frac{U_{em}}{I_t}. \quad (25)$$

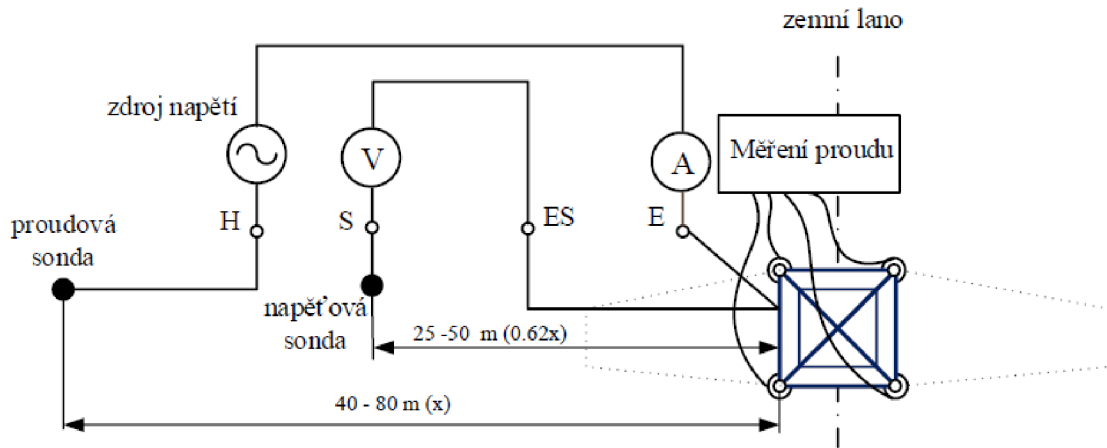
Tato metoda se využívá pro měření uzemnění podpěrných bodů distribučních soustav vvn a zvn. Měřicí sondy H a S se umísťují minimálně do vzdálenosti 40 m, např. pokud se jedná o vedení 400 kV, doporučuje se vzdálenost 80–100 m [5].



Obrázek 3.9 4 - pólová metoda [5]

3.3.5 4 – pólová metoda 62 %

Metoda se používá, pokud jsme prostorově omezeni objekty v terénu a nelze použít základní metodu. Napěťová sonda se umísťuje do 62 % vzdálenosti proudové sondy. Měření opakujeme pro různá umístění napěťové sondy a výslednou hodnotu určíme aritmetickým průměrem [5].

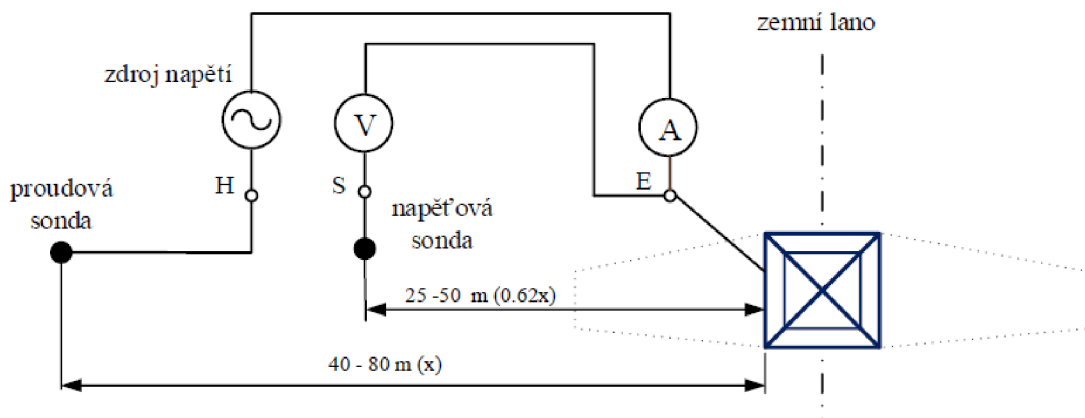


Obrázek 3.10 4 - pólová metoda 62 % [5]

3.3.6 3 – pólová metoda

Je odvozena od metody 62 % a používá se pro jednodušší měřicí přístroje. Metoda je určena pro měření odporů zemničů, které jsou odpojeny od zemního lana navazujících obvodů. Dále ji můžeme použít pro měření 1–5 kHz. Používá se pouze výjimečně z důvodu nízké přesnosti.

Měřený zemnič, napěťová a proudová elektroda jsou umístěny na jedné lince a ve stejném směru od měřeného zemniče, elektrody se umísťují kolmo k vedení. Napěťová elektroda se umísťuje do 0,62 vzdálenosti proudové elektrody od středu měřeného uzemnění [5].

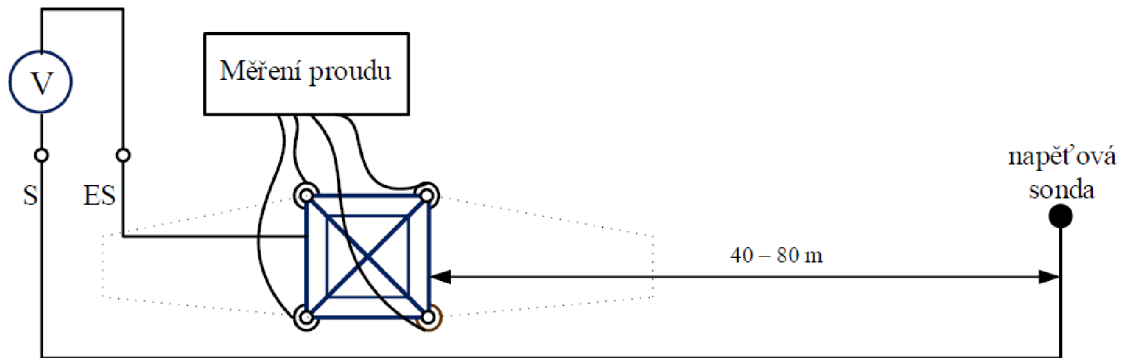


Obrázek 3.11 3 - pólová metoda [5]

3.3.7 Pasivní metoda

Při použití této metody měříme proud 50 Hz podpěrným bodem do země a napětí na uzemnění proti vzdálené zemi S.

Metoda se používá v případech, kdy není možné připojit měřicí zdroj napětí, pokud je napětí U_{S-ES} příliš vysoké a pro kontrolu měření provedené jinými metodami [5].



Obrázek 3.12 Pasivní metoda [5]

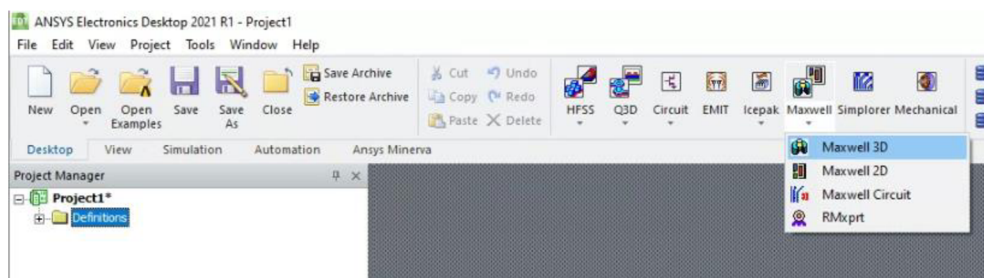
4. SIMULACE UZEMNĚNÍ V ANSYS ELECTRONICS

Ansyes Electronics Desktop (AED) je platforma, která umožňuje skutečný návrh elektronických systémů. AED poskytuje přístup k elektromagnetickým simulačním řešením Ansys, jako jsou Ansys HFSS (vysoko frekvenční simulační software), Ansys Maxwell, Ansys Q3D Extractor (Multifyzikální extrakce a analýza nežádoucích jevů), Ansys SIwave (Analýza integrity signálu, integrity napájení a elektromagnetického rušení pro návrh plošných spojů) a Ansys Icepak (Software pro simulaci chlazení elektronických součástek), pomocí pracovních postupů elektrických (ECAD) a mechanických (MCAD). Kromě toho obsahuje také přímé odkazy na kompletní portfolio tepelných, fluidních a mechanických řešičů Ansys pro komplexní analýzu Multiphysics. Těsná integrace mezi těmito řešeními poskytuje uživateli bezprecedentně snadné použití pro nastavení a rychlejší řešení komplexních simulací pro návrh a optimalizaci.

Při rozhodování, zda v konfiguraci modelu FEA (analýza konečných prvků) použít šestistěnné nebo čtyřstěnné prvky, je důležité mít na paměti celkový tvar a složitost samotného objektu. Obecným pravidlem je, že pokud je to možné, je třeba síťovat pomocí šestistěnných prvků. Šestistěnné prvky obecně vedou k přesnějším výsledkům při nižším počtu prvků než čtyřstěnné prvky. Pokud však objekt obsahuje ostré úhly nebo jinou složitou geometrii, může být nutné síťovat pomocí čtyřstěnných prvků.

4.1 Postup při modelování zemničů v AED

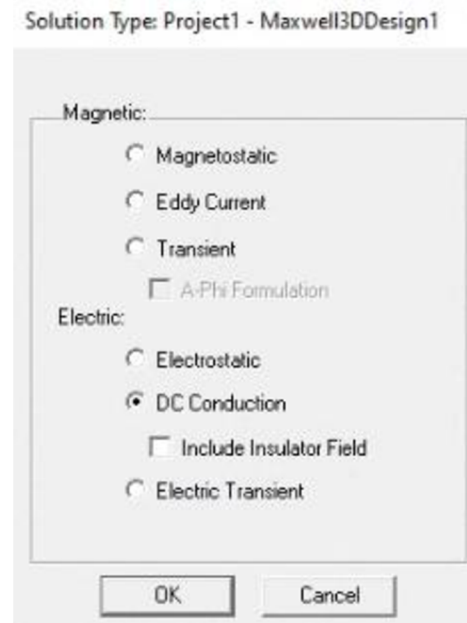
Modelování a simulace jsou prováděny v Maxwell 3D, což je softwarový balík, který využívá analýzu konečných prvků (FEA) k řešení elektrických, magnetostatických a vířivých proudů a přechodových jevů. (**Desktop** → **Maxwell** → **Maxwell 3D**)



Obrázek 4.1 Volba prostředí Maxwell 3D

Pro simulaci byl zvolen typ výpočtu v DC Conduction, který řeší obecně elektromagnetické pole větších systémů. Oblast DC byla zvolena pro její frekvenci, která dosahuje až jednotek MHz. Řešenou veličinou je elektrický skalární potenciál (ϕ). Proudová hustota (σ) a elektrické pole (E) se automaticky vypočítají z elektrického

skalárního potenciálu (ϕ). Výběr DC Conduction se provádí **Maxwell 3D** → **Solution Type**. V okně Solution Type se zvolí **Electric** → **DC Conduction**.

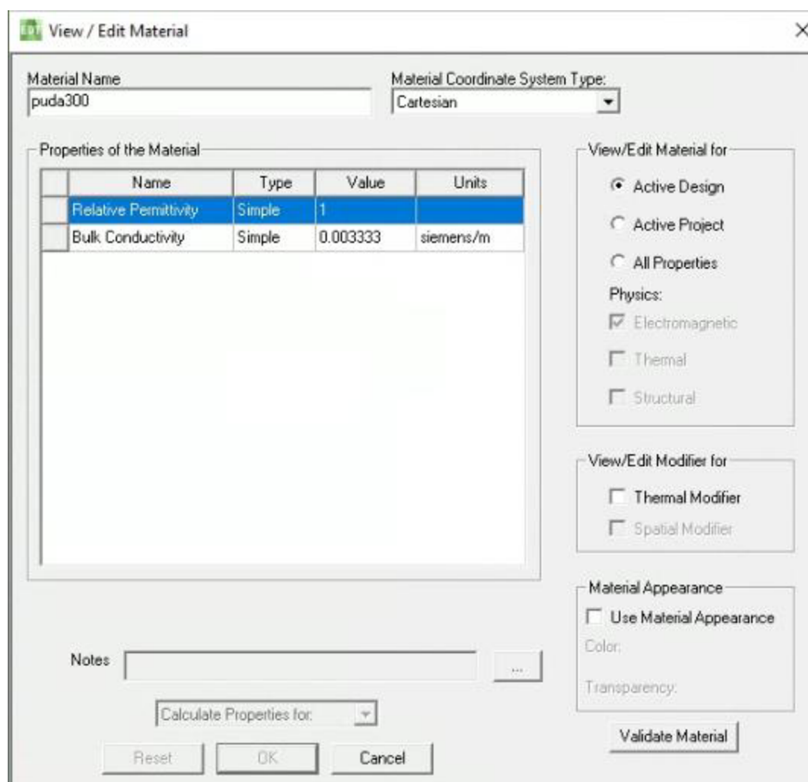


Obrázek 4.2 Typ analýzy

4.2 Volba materiálů

Následně v geometrii byly pro jednotlivé komponenty daného modelu přidány materiály, které se definují v **Definitions** → **Materials** → **Add Definition...**

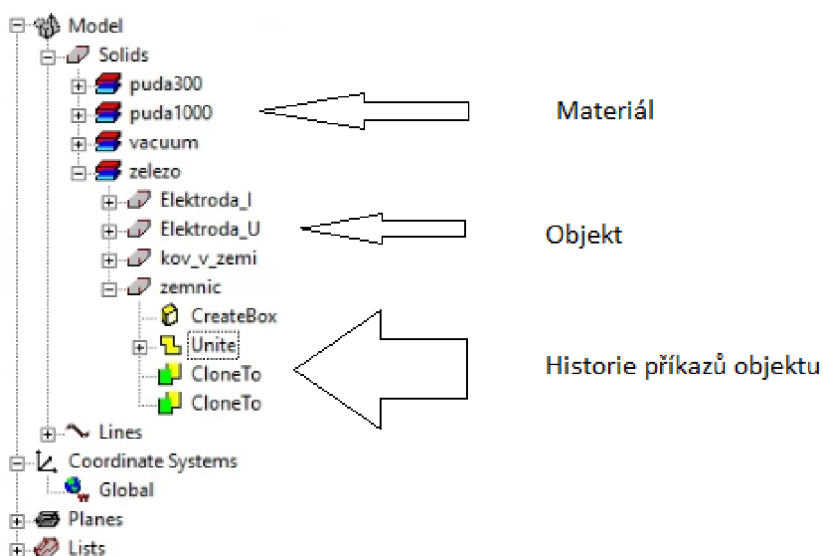
V práci uvažujeme čtyři typy materiálů (půda s rezistivitou 300 a 1000 $\Omega \cdot m$, železo s rezistivitou 98 $n\Omega \cdot m$ a vakuum s rezistivitou 0 $\Omega \cdot m$), které se definovaly pomocí vodivosti $G = \frac{1}{\rho}$ v jednotkách siemens/m ve funkci Bulk Conductivity, což je objemová vodivost, která určuje, zda je objekt vodičem (v elektrostatickém modelu se s ním zachází jako s dokonalým vodičem) nebo izolantem.



Obrázek 4.3 Nastavení materiálu půdy s rezistivitou $300 \Omega \cdot m$

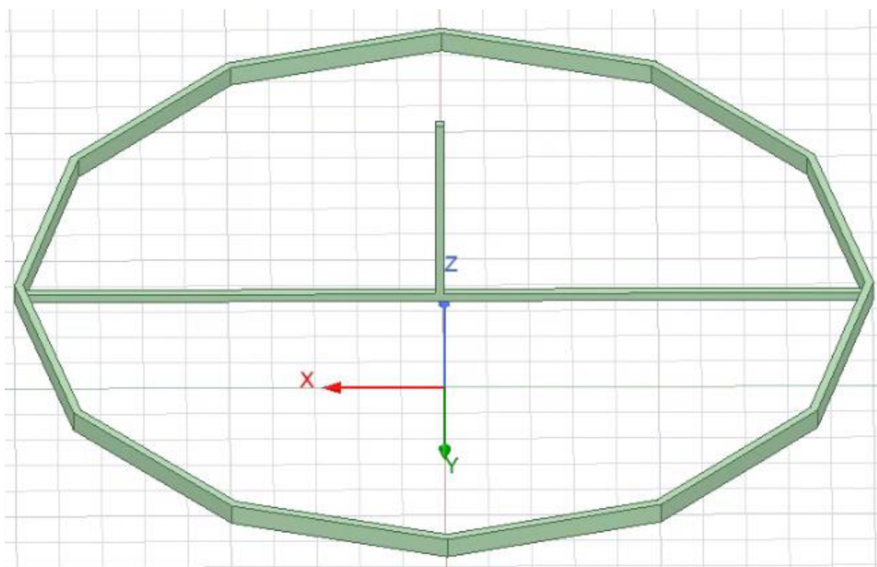
4.3 Postup modelování

Model byl vytvořen pomocí základních útvarů (koule, kvádr, válec), kreslení modelu bylo provedeno pomocí zadávání vektorových souřadnic x , y , z .



Obrázek 4.4 Seskupení podle materiálu

Zemnič je modelován z pravidelného dvanáctistěnu s výškou 10 centimetrů a poloměrem 2 m. Zemnič je uložen půl metru pod zem. Model zemniče byl proveden tak, že byly vytvořeny dva pravidelné 12tistěny RegularPolyhedron1 a RegularPolyhedron2, které mají stejné počáteční vektorové souřadnice, stejnou výšku a uložení v zemi. RegularPolyhedron1 má poloměr 2 metry a RegularPolyhedron2 má poloměr 1,97 metru. Pomocí funkce Subtract se odečetl menší 12tistěň od většího a vznikl nám prstenec, který je přes funkci Unite spojen středem tyčí o průřezu 40x40 mm. Do středu této tyče je přes funkci Unite připojena v kolmém směru další tyč jdoucí na povrch, která představuje vyvedení zemniče nad povrch země a do které je injektován poruchový nebo měřicí proud.

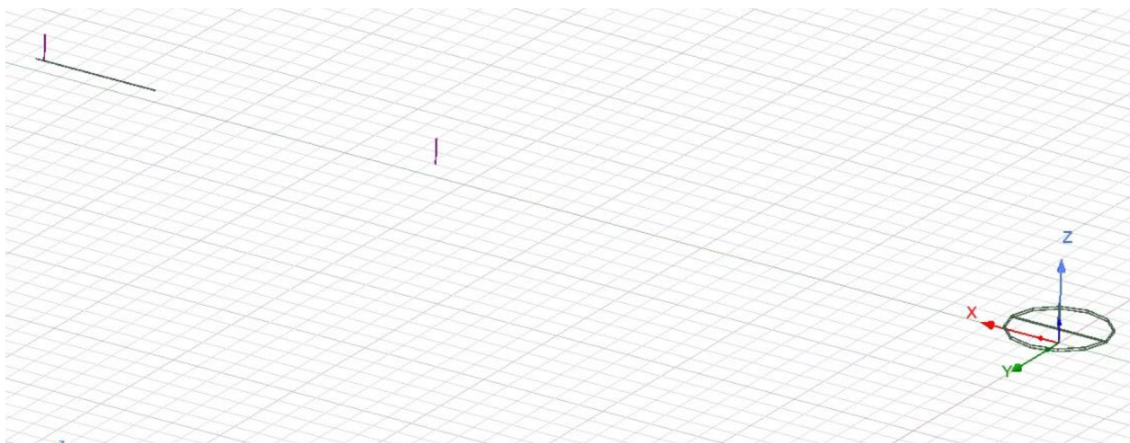


Obrázek 4.5 Model zemniče v Ansys Maxwell

Po namodelování zemniče jsou modelovány další železné materiály a těmi jsou elektrody (proudová a napěťová), případně náhodný zemnič. Napěťová elektroda je umístěna ve vzdálenosti 26,2 metru od středu zemniče ve vektorovém směru x . Má průřez 20x20 milimetrů s výškou 1 metr, přičemž je 0,5 metru zapuštěna pod povrch země.

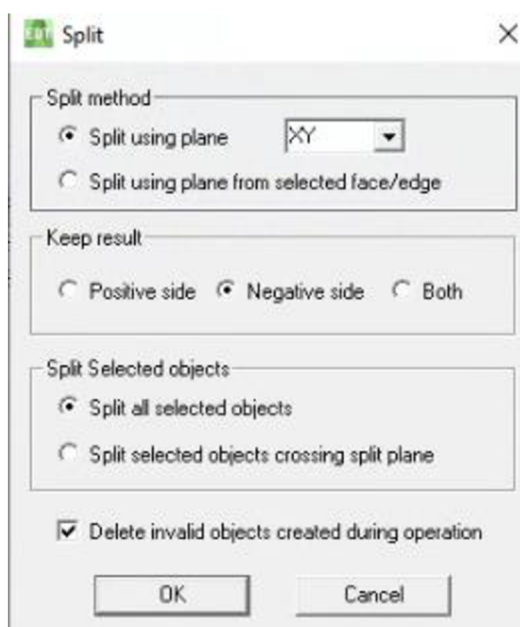
Proudová elektroda má stejné parametry jako napěťová, pouze s rozdílem jejího umístění, které je ve vzdálenosti 42,65 metrů od středu zemniče. Číslo bylo zvoleno náhodně, protože v praxi není vždy možné si zvolit určitou vzdálenost.

Náhodný zemnič je uložen 0,5 metru pod zem směrem od zemniče k elektrodám v různých vzdálenostech závislých na požadavcích jednotlivých simulací. Jeho průřez je 20x20 milimetrů a délka 5 metrů.



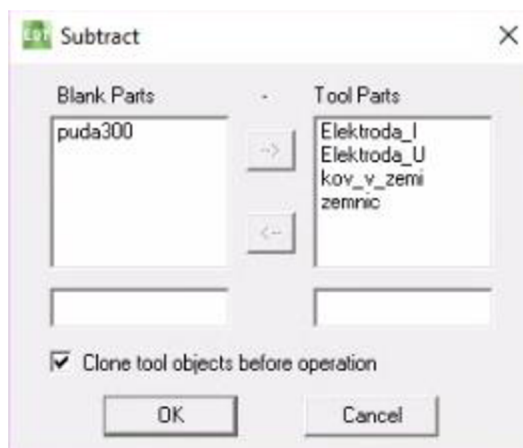
Obrázek 4.6 Rozložení elektrod a náhodného zemniče

Na závěr je vytvořen model půdy, který začíná v souřadnicích 0, 0, 0. Půda je vytvořena z koule o poloměru 200 metrů. Pomocí funkce Split je z koule vytvořena polokoule, viz Obrázek 4.7, na kterém lze vidět, že průřez byl prováděn v souřadnicích XY a odstraněna byla horní polokoule.



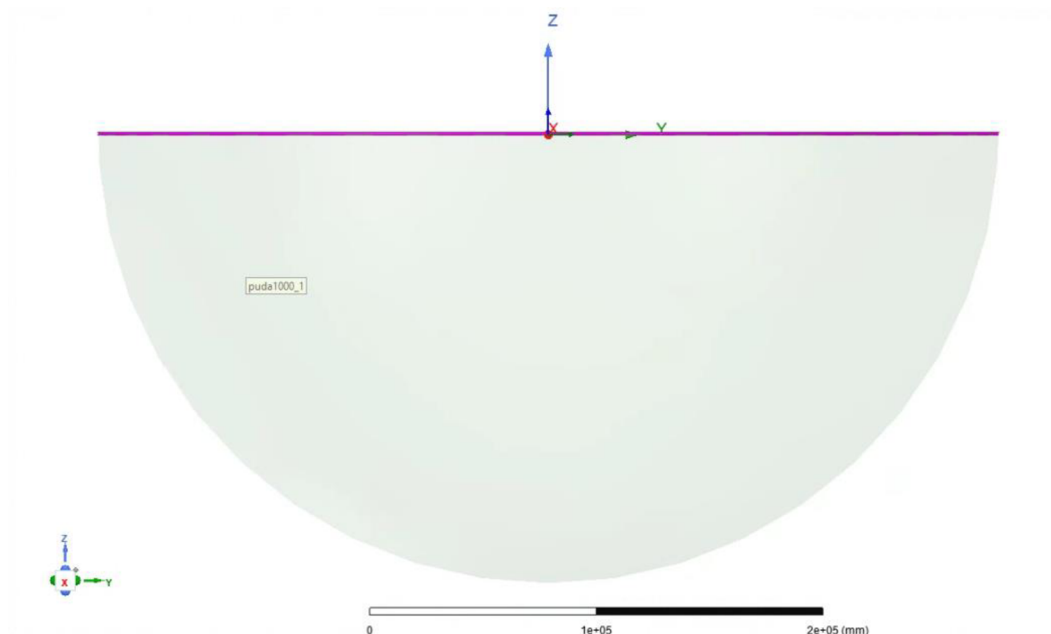
Obrázek 4.7 Funkce Split

Po vytvoření polokoule je zapotřebí pomocí funkce Subtract (Obrázek 4.8) odečíst od půdy proudovou a napěťovou elektrodu, zemnič a případně náhodný zemnič v zemi.



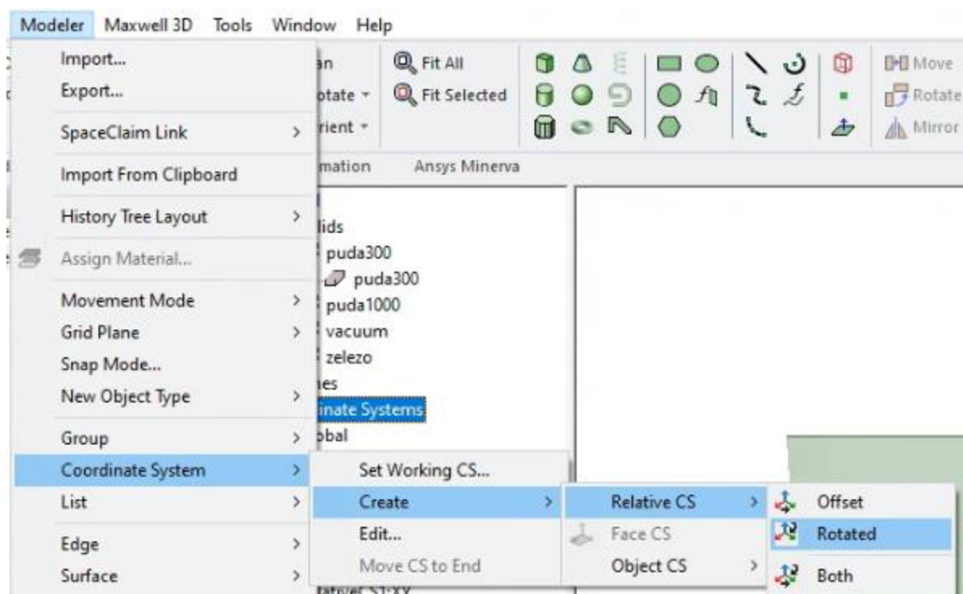
Obrázek 4.8 Funkce Subtract

Polokoule se posune v kladném smyslu vzhůru o určitou výšku a přes funkci Split se rozdělí na dvě části, viz Obrázek 4.9, a tím vznikne horizontálně dělený model půdy s dvěma vrstvami. Obě vrstvy je pak zapotřebí pomocí Move posunout zase zpět dolů o stejnou výšku o jakou byly posunuty vzhůru.

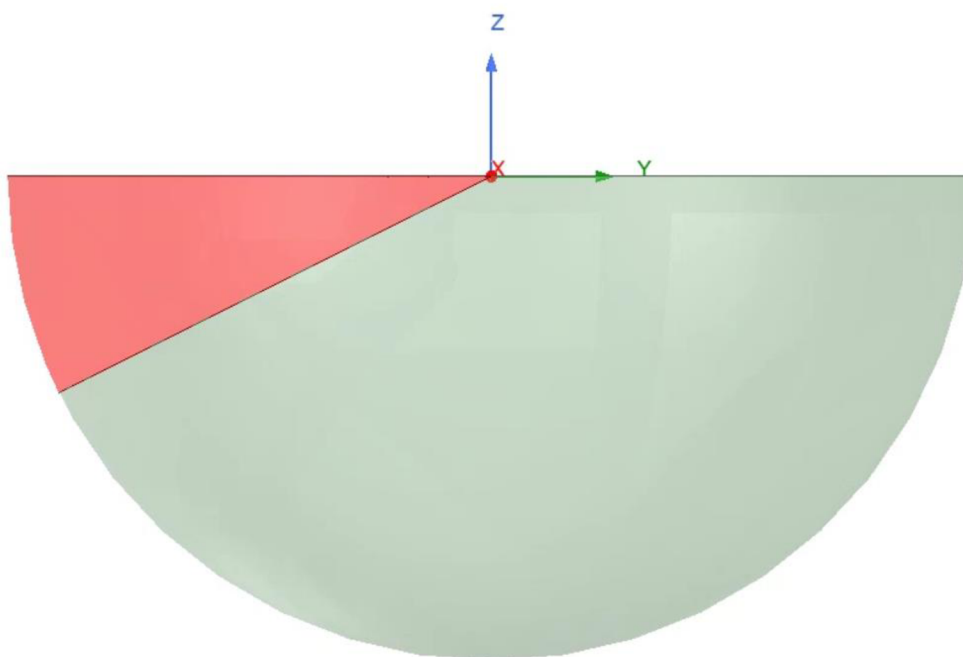


Obrázek 4.9 Dvouvrstvá horizontální půda

V případě půdy pod úhlem je zapotřebí vytvořit nové vektorové souřadnice pomocí pootočení aktuálních souřadnic přes vektory x , y , z , viz Obrázek 4.10. Nový souřadnicový systém je pootočen o 30° a funkcí Split se polokoule rozdělí v ose ZX viz Obrázek 4.11.

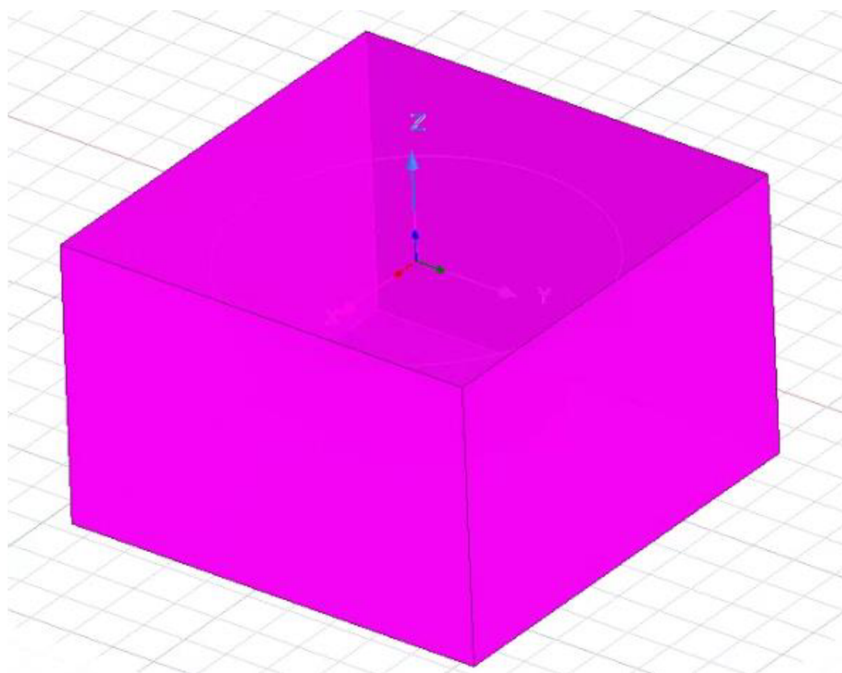


Obrázek 4.10 Vytvoření nových vektorových souřadnic



Obrázek 4.11 Půda pod úhlem

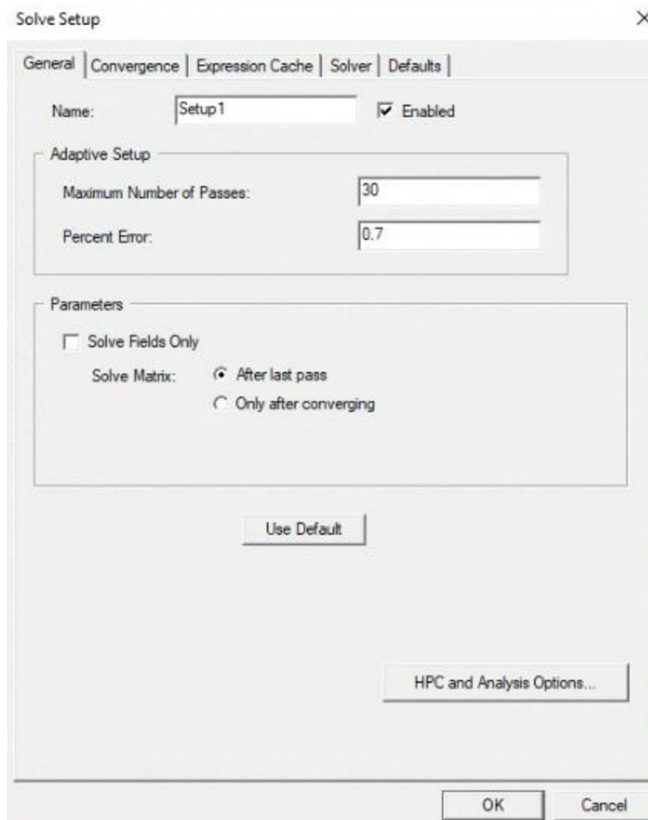
Po vytvoření a spojení jednotlivých komponentů do modelu je okolo modelu vytvořen Region vakua viz Obrázek 4.12. Region je objemová oblast (obecně se předpokládá vakuum), který model obklopuje. Výplň (tj. vzdálenost mezi modelem a hranicemi oblasti) se určuje automaticky [10].



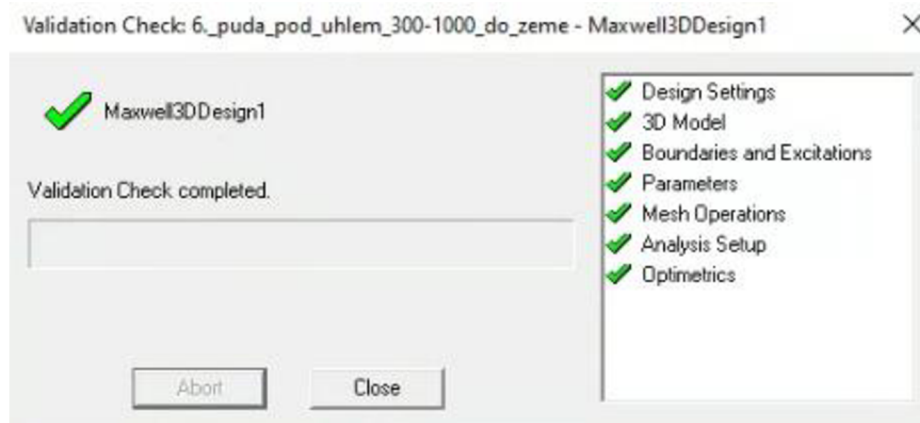
Obrázek 4.12 Region vakua

Nakonec je zapotřebí nastavení analýzy daného projektu, což je provedeno přes **Analysis** → **Add Solution Setup** (Obrázek 4.13). V okně General se nastaví Maximum Number of Passes na 30, které definuje limit počtu adaptivně zpřesněných průchodů, které počítač provede. Následně se nastaví Procent Error (procento chyby), je to cílová chyba pro cílovou energii. Pro analýzy je nastaven na 0,7.

Nakonec před spuštěním simulace je potřeba zkontrolovat Validation Check, zda byly jednotlivé požadované kroky správně provedeny (Obrázek 4.14) .



Obrázek 4.13 Solve Setup



Obrázek 4.14 Kontrola nastavení simulace v programu Ansys Maxwell

5. SIMULACE MĚŘENÍ UZEMNĚNÍ

V programu Ansys Electronics bylo vytvořeno celkem 34 projektů pro 6 různých variant modelů půd a metod jejich měření. Varianty modelů: Nehomogenita, Nehomogenita s náhodným zemničem, Horizontální dvouvrstvá půda, Horizontální dvouvrstvá půda s náhodným zemničem, Půda pod úhlem 30°, Půda pod úhlem 30° s náhodným zemničem.

Byl zkoumán vliv modelu půdy na výsledky měření. Simulace byly doplněny o přidání modelu náhodného zemniče, tvořeného železným páskem v ose měření, neboť lze předpokládat, že jeho přítomnost bude mít vliv na výsledky měření. Cílem bylo porovnat výsledek měření s odporem zemniče vůči vzdálené zemi a stanovit chybu měření.

Pro modely půdy byly uvažovány pouze dva stavy a to stav, kdy je rezistivita jedné vrstvy výrazně větší jak druhé a obráceně, kdy je naopak menší. Z předpokladu linearity chování výsledků není pak například důležité simulaci provádět pro jiné hodnoty při jejich stejném poměru, neboť by bylo dosaženo obdobných výsledků.

Pro měření se využívalo 4 – pólové metody 62 %, kterou bylo měřeno napětí na napěťové elektrodě. Toto měření bylo prováděno pětkrát ve vzdálenostech po metru, přičemž první měření začíná ve 24,2 metrech od zemniče a poslední měření bylo ve vzdálenosti 28,2 metrů (vzdálenost napěťové elektrody od zemniče je v tabulkách níže značena jako l_{PE}). Poté byl spočítán rozdíl napětí mezi potenciálem (zemničem) a napěťovou elektrodou a přes Ohmovu metodu byl vypočtený odpor zemniče pro jednotlivé vzdálenosti napěťové elektrody od zemniče. Nakonec byla stanovena průměrná hodnota zemničího odporu měřením \bar{R} .

Druhou variantou bylo měření v kolmém směru elektrod mezi sebou. Proudová elektroda zůstala na ose x , zatímco napěťová elektroda se přesunula na osu y . Měření a stanovení výsledků bylo provedeno stejným postupem jako u metody 4 – pólové. Toto měření bude využito pouze u projektů s nehomogenní půdou a půdou dělenou pod úhlem, pro demonstraci nepřesností obou metod měření.

Dále byl měřen skutečný odpor zemniče vůči vzdálené zemi, ke kterému dochází při poruše a následně svodu proudu do země. Zde jsou měřeny nárusty napěťového potenciálu země (EPR), z kterého je spočítáný Ohmovou metodou odpor země.

V každé simulaci byl do zemniče přiveden elektrický proud o velikosti 10A, přičemž v jednom případě je proudovodná cesta tvořena cestou: zdroj, zemnič půda a proudová elektroda, kdežto v druhém případě je proudovodná cesta tvořena zdroj, zemnič, celkový model půdy, vzdálená zem (tvořená vnějším okrajem modelu půdy-polokulovou plochou).

V tabulkách pro simulace skutečného měření (například Tabulka 5.2) jsou naměřené hodnoty napětí U_m , které byly odečteny z průběhu napětí závislého na vzdálenosti, který byl vytvořen po skončení simulace. Následně je stanoven rozdíl napětí ΔU z celkového potenciálu U_{EPR} a naměřených hodnot napětí U_m . Z rozdílu napětí ΔU byl pomocí

Ohmova zákona stanoven odpor zemniče simulovaným měřením. Měření bylo prováděno pětkrát a byla stanovena průměrná hodnota odporu zemniče \bar{R} .

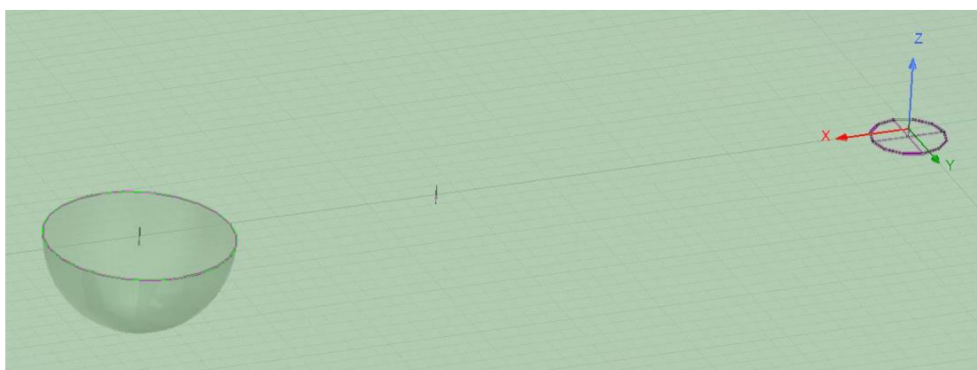
5.1 Homogenní půda s lokální nehomogenitou

První model obsahuje polokouli o poloměru 200 metrů, ve které je vytvořena polokulová nehomogenita o poloměru 5 metrů a v jejímž středu se nachází proudová elektroda ve vzdálenosti 42,65 metrů od středu zemniče. Obrázek 5.1 ukazuje elektrody, uzemňovač a nehomogenitu v homogenní půdě.

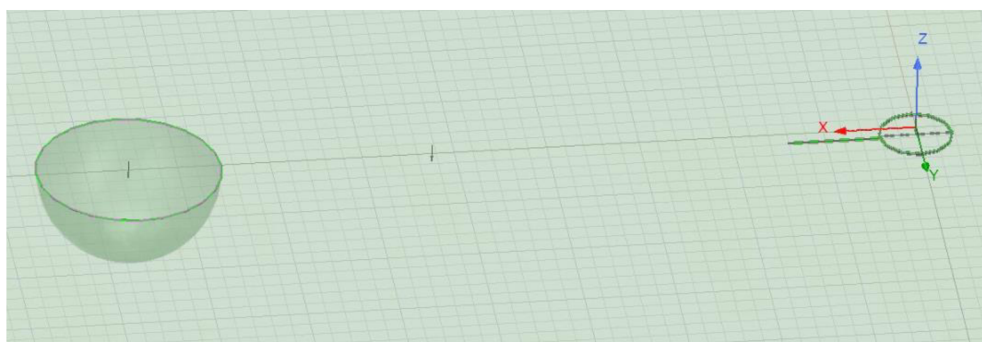
Druhý model má stejné parametry jako předchozí pouze s rozdílem přidání náhodného zemniče ze železa (Obrázek 5.2), který má průřez 50x50 milimetrů, délku 5 metrů a uložení v hloubce 0,6 metrů. V jednotlivých simulacích je náhodný zemnič posouván mezi zemničem a proudovou elektrodou a zjišťuje se, do jaké míry je schopen ovlivnit měření odporu zemniče.

Měření je prováděno 4 - pólovou metodou 62 % s elektrodami v rovnoběžném směru a ve směru elektrod na sebe kolmém, přičemž proudová elektroda zůstává v lokální nehomogenitě, zatímco napěťová elektroda se posouvá o 90 stupňů.

Pro všechny tabulky bude platit, že poměr rezistivity znamená homogenní půda / lokální nehomogenita (například poměr 1000/300).



Obrázek 5.1 Model s lokální nehomogenitou



Obrázek 5.2 Model s lokální nehomogenitou a náhodným zemničem v blízkosti zemniče

Tabulka 5.1 obsahuje výsledky pro zjištění odporu zemniče vůči vzdálené zemi pro homogenní půdu s lokální nehomogenitou bez náhodného zemniče a s náhodným zemničem. Při srovnání odporů vůči vzdálené zemi u poměru 1000/300 bez a s náhodným zemničem je vidět pokles o 3,71 % odporu zemniče z 109,06 na 105,01 $\Omega \cdot m$. Zatímco u poměru 300/1000 se vlivem menší rezistivity homogenní půdy odpor zemniče snížil o 1,45 % z 31,97 na 31,50 $\Omega \cdot m$. V přílohách A.1, A.2, A.3, A.4, B.1, B.2, B.3, B.4, lze vidět grafy, které zobrazují závislost napětí na vzdálenosti a napěťové pole jednotlivých měření.

Tabulka 5.1 Odpor vůči vzdálené zemi

		I [A]	10
		U_{EPR} [kV]	R [Ω]
bez náhodného zemniče	$\rho=1000/300$	1,0906	109,0600
	$\rho=300/1000$	0,3196	31,9650
s náhodným zemničem	$\rho=1000/300$	1,0501	105,0100
	$\rho=300/1000$	0,3150	31,5000

Simulace následně pokračovaly simulací skutečného měření, viz Tabulka 5.2, kde jsou uvedeny výsledky ze simulovaného měření, které jsou dále porovnány s výsledky zemních odporů vůči vzdálené zemi.

Tabulka 5.2 ukazuje porovnání přesností měření dvou metod, kde první metoda je měření v rovnoběžném směru, které vůči vzdálené zemi nepřesahuje rozdíl $\Delta \bar{R} = 0,38 \%$, zatímco u měření v kolmém směru vůči vzdálené zemi se pohybuje kolem $\Delta \bar{R} = 6 \%$, poněvadž napěťová elektroda není ovlivněna lokální nehomogenitou, kterou byl ovlivněn skutečný odpor vůči vzdálené zemi. Průměrný pokles odporu zemniče je $\Delta \bar{R} = 6,22 \Omega$ u měření v kolmém směru při poměru 1000/300. Přílohy A.5, A.7, A.9, A.10 vykreslují průběh napětí pro U_m a přílohy A.6, A.8 vykreslují napěťové pole pro daný model půdy, viz Tabulka 5.2.

V Tabulka 5.3 je porovnání chyby měření způsobené nepřesným rozmístěním elektrod do země a náhodným zemničem, který ovlivňuje vlastnosti půdy a rozložení napěťového pole, viz Příloha B.6, B.8. V případě měření v kolmém směru je chyba měření vyšší, protože měření je prováděno ve větší vzdálenosti od lokální nehomogenity, tudíž toto měření není tolik ovlivněno jako skutečný odpor vůči vzdálené zemi. Zatímco průměrná chyba odporu zemniče při měření v rovnoběžném směru vůči zemnímu odporu vzdálené země poklesne o $\Delta \bar{R} = 0,79 \%$, což je $\Delta \bar{R} = 0,25 \Omega$, tak u měření v kolmém směru je průměrná chyba měření daleko vyšší a jedná se o pokles $\Delta \bar{R} = 6,9 \%$, který odpovídá $\Delta \bar{R} = 2,18 \Omega$ u poměru 300/1000. Průběhy napětí U_m , lze vidět v příloze B.5, B.7, B.9, B.10.

Tabulka 5.2 Měření homogenní půdy s lokální nehomogenitou pomocí konfigurace reálného měření zemniče

U_{EPR} [kV]	5,0888	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	1000/300			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
měření v rovnoběžném směru								
U_m [kV]	4,0100	4,0024	3,9948	3,9862	3,9769			
ΔU [kV]	1,0788	1,0864	1,0940	1,1026	1,1119			
R [Ω]	107,88	108,64	109,40	110,2600	111,1900	109,4740	-0,4140	0,3796
měření v kolmém směru								
U_m [kV]	4,0647	4,0623	4,0602	4,0583	4,0564			
ΔU [kV]	1,0241	1,0265	1,0286	1,0305	1,0324			
R [Ω]	102,4100	102,6500	102,8600	103,0500	103,2400	102,8420	6,2180	-5,7014
U_{EPR} [kV]	12,8785	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	300/1000			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
měření v rovnoběžném směru								
U_m [kV]	12,5640	12,5617	12,5594	12,5569	12,5541			
ΔU [kV]	0,3145	0,3168	0,3191	0,3216	0,3244			
R [Ω]	31,4500	31,6800	31,9100	32,1600	32,4400	31,9280	0,0370	-0,1157
měření v kolmém směru								
U_m [kV]	12,5803	12,5796	12,5790	12,5784	12,5779			
ΔU [kV]	0,2982	0,2989	0,2995	0,3001	0,3006			
R [Ω]	29,8200	29,8900	29,9500	30,0100	30,0600	29,9460	2,0190	-6,3162

Tabulka 5.3 Měření homogenní půdy s lokální nehomogenitou pomocí konfigurace reálného měření zemniče, v jehož blízkosti se nachází náhodný zemnič.

U_{EPR} [kV]	5,0456	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	1000/300			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
měření v rovnoběžném směru								
U_m [kV]	4,0104	4,0026	3,9947	3,9860	3,9767			
ΔU [kV]	1,0352	1,0430	1,0509	1,0596	1,0689			
R [Ω]	103,5200	104,3000	105,0900	105,9600	106,8900	105,152	-0,1420	0,1352
měření v kolmém směru								
U_m [kV]	4,0719	4,0697	4,0677	4,0658	4,0640			
ΔU [kV]	0,9737	0,9759	0,9779	0,9798	0,9816			
R [Ω]	97,3700	97,5900	97,7900	97,9800	98,1600	97,7780	7,2320	-6,8870
U_{EPR} [kV]	12,8787	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	300/1000			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
měření v rovnoběžném směru								
U_m [kV]	12,5710	12,5687	12,5663	12,5638	12,5611			
ΔU [kV]	0,3077	0,3100	0,3124	0,3149	0,3176			
R [Ω]	30,7700	31,0000	31,2400	31,4900	31,7600	31,2520	0,2480	-0,7873
měření v kolmém směru								
U_m [kV]	12,5868	12,5861	12,5855	12,5849	12,5844			
ΔU [kV]	0,2919	0,2926	0,2932	0,2938	0,2943			
R [Ω]	29,1900	29,2600	29,3200	29,3800	29,4300	29,3160	2,1840	-6,9333

Pro měření napětí při umístění náhodného zemniče před napěťovou a poté proudovou elektrodou byla zvolena pouze metoda 4 - pólová v rovnoběžném směru elektrod z důvodu větší přesnosti měření než u měření kolmém směru, které je pro následující měření důležité.

V Tabulka 5.4 a Tabulka 5.5 byla relativní chyba odporu zemniče počítána vůči vzdálené zemi bez náhodného zemniče pro zjištění chyby měření způsobené ovlivněním půdy náhodným zemničem. Nepřesnost měření se pohybuje v tabulkách pro obě umístění náhodného zemniče v rozmezí od $\Delta\bar{R} = 0,07 \%$ do $\Delta\bar{R} = 0,98 \%$, kromě případu, kdy náhodný zemnič vstupuje do lokální nehomogenity o rezistivitě $\rho=1000 \Omega \cdot m$ před proudovou elektrodou. Nepřesnost měření v tomto případě je $\Delta\bar{R} = 2,23 \%$ proti odporu vůči vzdálené zemi, což je způsobeno především vlivem náhodného zemniče v půdě.

Pro Tabulka 5.4 přílohy B.11, B.13 vykreslují průběh napětí pro U_m a přílohy B.12, B.14 vykreslují napěťové pole v modelu. Dále pro Tabulka 5.5 přílohy B.15, B.17 vykreslují průběh napětí pro U_m a přílohy B.16, B.18 vykreslují napěťové pole v modelu.

Tabulka 5.4 Měření homogenní půdy s lokální nehomogenitou pomocí konfigurace reálného měření zemniče s náhodným zemničem před napěťovou elektrodou.

U_{EPR} [kV]	5,0889	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	1000/300			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	ΔR [Ω]	ΔR [%]
U_m [kV]	4,0192	4,0121	3,9982	3,9879	3,9778			
ΔU [kV]	1,0697	1,0768	1,0907	1,1010	1,1111			
R [Ω]	106,9700	107,6800	109,0700	110,1000	111,1100	108,9860	0,0740	-0,0679
U_{EPR} [kV]	12,8963	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	300/1000			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	ΔR [Ω]	ΔR [%]
U_m [kV]	12,5815	12,5797	12,5958	12,5725	12,5694			
ΔU [kV]	0,3148	0,3166	0,3005	0,3238	0,3269			
R [Ω]	31,4800	31,6600	30,0500	32,3800	32,6900	31,6520	0,3130	-0,9791

Tabulka 5.5 Měření homogenní půdy s lokální nehomogenitou pomocí konfigurace reálného měření zemniče s náhodným zemničem před proudovou elektrodou.

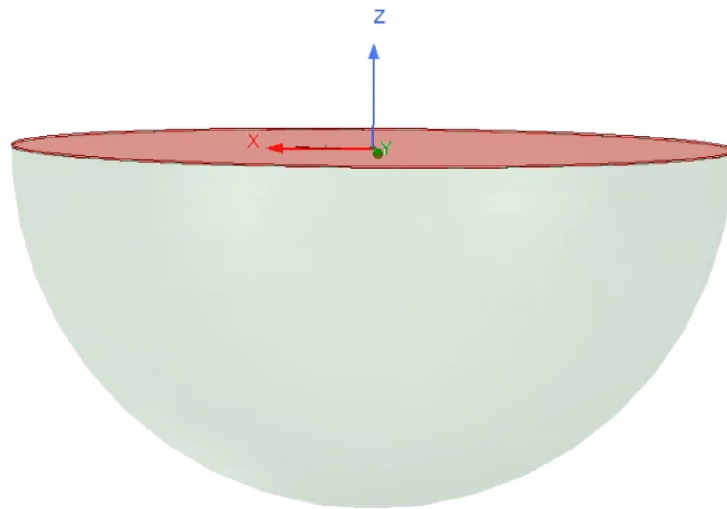
U_{EPR} [kV]	5,0864	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	1000/300			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	ΔR [Ω]	ΔR [%]
U_m [kV]	4,0059	3,9981	3,9898	3,9810	3,9711			
ΔU [kV]	1,0805	1,0883	1,0966	1,1054	1,1153			
R [Ω]	108,0500	108,8300	109,6600	110,5400	111,5300	109,7220	-0,6620	0,6070
U_{EPR} [kV]	12,896	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	300/1000			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	ΔR [Ω]	ΔR [%]
U_m [kV]	12,5740	12,5716	12,5692	12,5666	12,5637			
ΔU [kV]	0,3220	0,3244	0,3268	0,3294	0,3323			
R [Ω]	32,2000	32,4400	32,6800	32,9400	33,2300	32,6980	-0,7330	2,2932

5.2 Horizontálně dělená půda

První model má dvě vrstvy pod sebou, viz Obrázek 5.4. Vrstva1 (horní vrstva) má hloubku 2 metry a v ní je uložen zemniče a elektrody se stejnými parametry jako v kapitole 5.1. Vrstva2 (spodní vrstva) je zbytek modelu půdy o hloubce 198 metrů.

Druhý model horizontálně dělené půdy má stejné parametry jako předchozí model pouze s rozdílem přidání náhodného zemniče se stejnými parametry a umístěním v jednotlivých modelech jako je popisováno v Kapitole 5.1

Pro všechny tabulky bude platit, že poměr rezistivity znamená Vrstva2 / Vrstva1 (například poměr $\rho = 1000/300$).



Obrázek 5.3 Model horizontální půdy

Tabulka 5.6 obsahuje výsledky pro zjištění odporu zemniče vůči vzdálené zemi pro horizontálně dělenou půdu bez náhodného zemniče a s náhodným zemničem. Při srovnání skutečných odporů s a bez náhodného zemniče vůči vzdálené zemi u poměru $\rho = 1000/300$ je vidět pokles průměrného odporu zemniče z 64,61 na 63,45 $\Omega \cdot m$, což je pokles o $\Delta \bar{R} = 1,79 \%$. Tento pokles byl způsobený vlivem přidání náhodného zemniče do blízkosti zemniče. Při poměru $\rho = 300/1000$ se vlivem větší rezistivity ve Vrstvě1 odpor snížil o $\Delta \bar{R} = 3,92 \%$. V přílohách C.1, C.2, C.3, C.4, D.1, D.2, D.3, D.4, lze vidět grafy, které zobrazují závislost napětí na vzdálenosti a napěťové pole jednotlivých měření.

Tabulka 5.6 Odpor vůči vzdálené zemi

		I [A]	10
		$U_{EPR}[V]$	R [Ω]
bez náhodného zemniče	$\rho=1000/300$	646,0851	64,6085
	$\rho=300/1000$	596,0029	59,6003
s náhodným zemničem	$\rho=1000/300$	634,4961	63,4496
	$\rho=300/1000$	572,6618	57,2662

Simulace následně pokračovaly simulací skutečného měření, kde jsou uvedeny výsledky ze simulovaného měření, které jsou dále porovnány s výsledky zemních odporů vůči vzdálené zemi.

U horizontálně dělené půdy je využito pouze měření v rovnoběžném směru z důvodu prakticky nulového rozdílu v přesnosti měření oproti měření v kolmém směru. Jak lze vidět z Tabulka 5.7 a Tabulka 5.8, měření se pohybuje s odchylkou $\Delta\bar{R}$ v rozmezí od 0,1 % až 1,05 % pro obě tabulky. V přílohách C.5, C.6, C.7, C.8, D.5, D.6, D.7, D.8, lze vidět grafy, které zobrazují závislost napětí na vzdálenosti a napěťové pole jednotlivých měření.

Tabulka 5.7 Měření horizontálně dělené půdy pomocí konfigurace reálného měření zemniče.

U_{EPR} [kV]	12,7096	I [A]	10	ρ [$\Omega\cdot m$]	1000/300			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
U_m [kV]	12,0677	12,0654	12,0630	12,0605	12,0577			
ΔU [kV]	0,6419	0,6442	0,6466	0,6491	0,6519			
R [Ω]	64,1900	64,4200	64,6600	64,9100	65,1900	64,6740	-0,0655	0,1014
U_{EPR} [kV]	4,759	I [A]	10	ρ [$\Omega\cdot m$]	300/1000			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
U_m [kV]	4,1716	4,1646	4,1573	4,1494	4,1408			
ΔU [kV]	0,5874	0,5944	0,6017	0,6096	0,6182			
R [Ω]	58,7400	59,4400	60,1700	60,9600	61,8200	60,2260	-0,6257	1,0498

Tabulka 5.8 Měření horizontálně dělené půdy pomocí konfigurace reálného měření zemniče, v jehož blízkosti se nachází náhodný zemnič.

U_{EPR} [kV]	12,6821	I [A]	10	ρ [$\Omega\cdot m$]	1000/300			
délka [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
U_m [kV]	12,0540	12,0517	12,0493	12,0468	12,0440			
ΔU [kV]	0,6281	0,6304	0,6328	0,6353	0,6381			
R [Ω]	62,8100	63,0400	63,2800	63,5300	63,8100	63,2940	0,1556	-0,2452
U_{EPR} [kV]	4,7338	I [A]	10	ρ [$\Omega\cdot m$]	300/1000			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
U_m [kV]	4,1710	4,1636	4,1559	4,1480	4,1394			
ΔU [kV]	0,5628	0,5702	0,5779	0,5858	0,5944			
R [Ω]	56,2800	57,0200	57,7900	58,5800	59,4400	57,8220	-0,5558	0,9706

U horizontálně dělené půdy je využito pouze měření v rovnoběžném směru z důvodu prakticky nulového rozdílu v přesnosti měření oproti měření v kolmém směru. Jak lze vidět z Tabulka 5.7 a Tabulka 5.9 Tabulka 5.8, měření se pohybuje s odchylkou $\Delta\bar{R}$ v rozmezí od 0,1 % až 1,05 % pro obě tabulky.

U měření s náhodným zemničím před proudovou elektrodou (Tabulka 5.9) byla přesnost měření stanovena vůči vzdálené zemi bez náhodného zemniče pro zjištění chyby měření způsobené ovlivněním půdy náhodným zemničím. Po odečtení chyby měření nepřesným rozmístěním elektrod (rozdíl mezi relativními chybami Tabulka 5.7 a Tabulka 5.9) vychází pro poměr 1000/300 snížení odporu zemniče o $\Delta\bar{R} = 0,85$ %, což znamená z 64,67 na 64,13 $\Omega\cdot m$. U poměru 300/1000 se odpor zemniče zvětší o $\Delta\bar{R} = 0,8$ % (z 60,23 na 60,7 $\Omega\cdot m$). V přílohách D.9, D.10, D.11, D.12, lze vidět grafy, které zobrazují závislost napětí na vzdálenosti a napěťové pole jednotlivých měření.

Tabulka 5.9 Měření horizontálně dělené půdy pomocí konfigurace reálného měření zemniče s náhodným zemničím před proudovou elektrodou.

U_{EPR} [kV]	11,605	I [A]	10	ρ [$\Omega\cdot m$]	1000/300			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
U_m [kV]	10,9690	10,9666	10,9640	10,9611	10,9579			
ΔU [kV]	0,6360	0,6384	0,6410	0,6439	0,6471			
R [Ω]	63,6000	63,8400	64,1000	64,3900	64,7100	64,1280	0,4805	-0,7437
U_{EPR} [kV]	4,2978	I [A]	10	ρ [$\Omega\cdot m$]	300/1000			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
U_m [kV]	3,7073	3,6996	3,6915	3,6828	3,6728			
ΔU [kV]	0,5905	0,5982	0,6063	0,6150	0,6250			
R [Ω]	59,0500	59,8200	60,6300	61,5000	62,5000	60,7000	-1,0997	1,8451

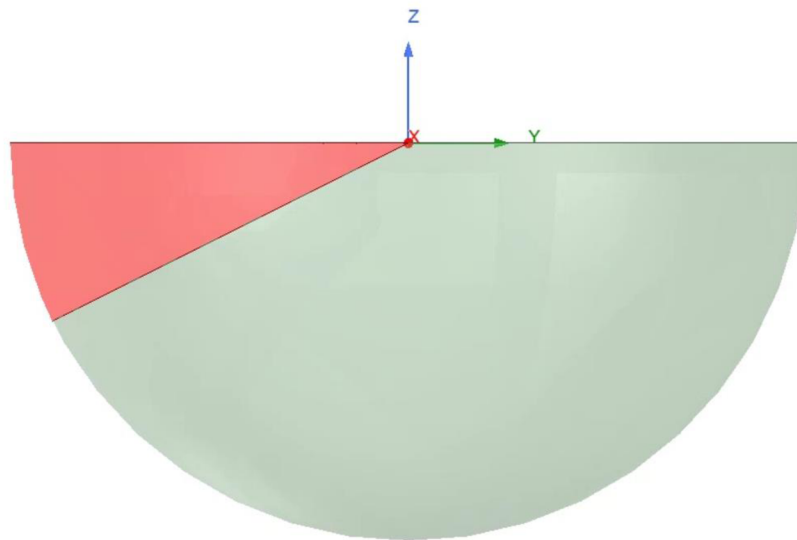
5.3 Půda rozdělená pod úhlem 30°

První model půdy je rozdělený pod úhlem 30° a má dvě vrstvy (Obrázek 5.4) s odlišnými rezistivitami. Ve Vrstvě1 (30° výseč) jsou umístěny elektrody a část zemniče, který je zbylou částí ve Vrstvě2. Parametry jednotlivých prvků jsou stejné jako v kapitole 5.1.

Druhý model má stejné parametry jako první model pouze s rozdílem uložení náhodného zemniče do Vrstvy1. Náhodný zemnič má stejné parametry a postup měření odporu, jako je popisováno v kapitole 5.1.

Měření je prováděno 4 - pólovou metodou 62 % s elektrodami v rovnoběžném směru a ve směru elektrod na sebe kolmém, přičemž proudová elektroda zůstává ve Vrstvě1, zatímco napěťová elektroda se posouvá o 90 stupňů na pomezí Vrstvy1 a Vrstvy2.

Pro všechny tabulky bude platit, že poměr rezistivity znamená Vrstva2 / Vrstva1 (například poměr 1000/300).



Obrázek 5.4 Model půdy rozdělné pod úhlem

V Tabulka 5.10 jsou obsaženy výsledky pro zjištění odporu zemniče vůči vzdálené zemi pro půdu dělenou pod úhlem bez náhodného zemniče a s náhodným zemničem. Při srovnání s odporem zemniče vůči vzdálené zemi u poměru 1000/300 s a bez náhodného zemniče je vidět pokles o 7,46 % odporu zemniče z 73,88 na 68,37 $\Omega \cdot m$ vlivem přidání náhodného zemniče do blízkosti zemniče. Zatímco u poměru 300/1000 vlivem menší rezistivity Vrstvy2 se odpor snížil pouze o 1,25 % (z 37,9 na 37,41 $\Omega \cdot m$). V přílohách E.1, E.2, E.3, E.4, F.1, F.2, F.3, F.4, lze vidět grafy, které zobrazují závislost napětí na vzdálenosti a napěťové pole jednotlivých měření.

Tabulka 5.10 Odpor vůči vzdálené zemi

		I [A]	10
		$U_{EPR}[V]$	R [Ω]
bez náhodného zemniče	$\rho=1000/300$	738,8252	73,8825
	$\rho=300/1000$	378,9616	37,8962
s náhodným zemničem	$\rho=1000/300$	683,688	68,3688
	$\rho=300/1000$	374,0709	37,4071

Simulace následně pokračovaly simulací skutečného měření, viz Tabulka 5.11, kde jsou uvedeny výsledky ze simulovaného měření, které jsou dále porovnány s výsledky zemních odporů vůči vzdálené zemi.

V Tabulka 5.11 a Tabulka 5.12 je vidět porovnání přesností měření pro dvě metody měření, přičemž obě metody jsou v půdě pod úhlem velice nepřesné z důvodu měření pouze ve Vrstvě1 (měření v rovnoběžném směru elektrod) nebo na pomezí obou Vrstev (měření v kolmém směru napěťové elektrody k proudové).

U měření bez náhodného zemniče v rovnoběžném směru při poměru $\rho = 300/1000$ dosahuje relativní chyba až $\Delta\bar{R} = 7,21 \%$, což je způsobeno především měřením ve výseči s větší rezistivitou oproti zbývajícimu modelu. Při měření v kolmém směru elektrod vůči sobě se pro oba poměry relativní chyba prakticky nebude měnit a pohybuje se v rozmezí od 5,31 % do 5,87 %. Je to způsobeno tím, že u obou případů bude napěťová elektroda přesně mezi Vrstvou1 a Vrstvou2. Přílohy E.5, E.7, E.9, E10 vykreslují průběh napětí pro U_m v Tabulka 5.11 a přílohy E.6, E.8 vykreslují napěťové pole pro daný model půdy.

Při měření s náhodným zemničem v rovnoběžném směru (Tabulka 5.12) dosahuje relativní chyba až $\Delta\bar{R} = 6,85 \%$ u poměru $\rho = 300/1000$, což je oproti měření bez náhodného zemniče (Tabulka 5.11) lepší přesnost o 0,36 %. To je způsobené přivedení potenciálu náhodným zemničem směrem k napěťové elektrodě při vyšší rezistivitě půdy. Relativní chyba měření v kolmém směru se zde pohybuje od 6,26 % do 6,92 % a byla vůči předchozímu měření v Tabulka 5.11 navíc ovlivněna náhodným zemničem. Přílohy F.5, F.7, F.9, F10 vykreslují průběh napětí pro U_m a přílohy F.6, F.8 vykreslují napěťové pole pro daný model půdy

Tabulka 5.11 Měření půdy pod úhlem pomocí konfigurace reálného měření zemniče

U_{EPR} [kV]	4,5527	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	1000/300			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
měření v rovnoběžném směru								
U_m [kV]	3,8392	3,8358	3,8324	3,8289	3,8252			
ΔU [kV]	0,7135	0,7169	0,7203	0,7238	0,7275			
R [Ω]	71,3500	71,6900	72,0300	72,3800	72,7500	72,0400	1,8425	-2,4939
měření v kolmém směru								
U_m [kV]	3,8603	3,8586	3,8570	3,8557	3,8545			
ΔU [kV]	0,6924	0,6941	0,6957	0,6970	0,6982			
R [Ω]	69,2400	69,4100	69,5700	69,7000	69,8200	69,5480	4,3345	-5,8668
U_{EPR} [kV]	13,1223	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	300/1000			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
měření v rovnoběžném směru								
U_m [kV]	12,7285	12,7229	12,7167	12,7099	12,7021			
ΔU [kV]	0,3938	0,3994	0,4056	0,4124	0,4202			
R [Ω]	39,3800	39,9400	40,5600	41,2400	42,0200	40,6280	-2,7318	7,2088
měření v kolmém směru								
U_m [kV]	12,7667	12,7659	12,7562	12,7646	12,764			
ΔU [kV]	0,3556	0,3564	0,3661	0,3577	0,3583			
R [Ω]	35,5600	35,6400	36,6100	35,7700	35,8300	35,8820	2,0142	-5,3149

Tabulka 5.12 Měření půdy pod úhlem pomocí konfigurace reálného měření zemniče, v jehož blízkosti se nachází náhodný zemnič.

U_{EPR} [kV]	4,4941	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	1000/300			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
měření v rovnoběžném směru								
U_m [kV]	3,8409	3,8374	3,8339	3,8304	3,8266			
ΔU [kV]	0,6532	0,6567	0,6602	0,6637	0,6675			
R [Ω]	65,3200	65,6700	66,0200	66,3700	66,7500	66,0260	2,3428	-3,4267
měření v kolmém směru								
U_m [kV]	3,8608	3,8592	3,8576	3,8562	3,8548			
ΔU [kV]	0,6333	0,6349	0,6365	0,6379	0,6393			
R [Ω]	63,3300	63,4900	63,6500	63,7900	63,9300	63,6380	4,7308	-6,9195
U_{EPR} [kV]	13,1197	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	300/1000			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
měření v rovnoběžném směru								
U_m [kV]	12,7325	12,7268	12,7208	12,7139	12,7060			
ΔU [kV]	0,3872	0,3929	0,3989	0,4058	0,4137			
R [Ω]	38,7200	39,2900	39,8900	40,5800	41,3700	39,9700	-2,5629	6,8514
měření v kolmém směru								
U_m [kV]	12,7704	12,7696	12,7690	12,7684	12,7679			
ΔU [kV]	0,3493	0,3501	0,3507	0,3513	0,3518			
R [Ω]	34,9300	35,0100	35,0700	35,1300	35,1800	35,0640	2,3431	-6,2638

V Tabulka 5.13 a Tabulka 5.14 byl procentuální rozdíl průměrného odporu zemniče počítán vůči skutečnému odporu bez náhodného zemniče pro zjištění chyby měření způsobené ovlivněním půdy náhodným zemničem. Relativní chyba je v rozmezí od 8,31 % do 8,63 % (Tabulka 5.13 a Tabulka 5.14). Toto rozpětí relativní chyby je pro poměr $\rho = 300/1000$ s náhodným zemničem, v jednom případě před napětíovou a v druhém před proudovou elektrodou. Díky náhodnému zemniči v půdě je zvýšena relativní chyba o 1,1 - 1,42 % vůči předchozímu měření bez náhodného zemniče, viz Tabulka 5.11. U poměru $\rho = 1000/300$ nedochází k výraznému nárůstu relativní chyby, která se pro všechny měření pohybuje v mezích 2,2 – 3,43 %, viz Tabulka 5.11, Tabulka 5.13, Tabulka 5.14.

V přílohách F.11, F.12, F.13, F.14 lze vidět grafy, které zobrazují závislost napětí na vzdálenosti a napěťové pole jednotlivých měření pro Tabulka 5.13. K Tabulka 5.14. náleží přílohy F.15, F.16, F.17, F.18.

Tabulka 5.13 Měření půdy pod úhlem pomocí konfigurace reálného měření zemniče s náhodným zemničem před napěťovou elektrodou.

U_{EPR} [kV]	4,5546	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	1000/300			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
U_m [kV]	3,8407	3,8369	3,8323	3,8263	3,8240			
ΔU [kV]	0,7139	0,7177	0,7223	0,7283	0,7306			
R [Ω]	71,3900	71,7700	72,2300	72,8300	73,0600	72,2560	1,6256	-2,2015
U_{EPR} [kV]	13,132	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	300/1000			
délka [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
U_m [kV]	12,7371	12,7307	12,7217	12,7087	12,7035			
ΔU [kV]	0,3949	0,4013	0,4103	0,4233	0,4285			
R [Ω]	39,4900	40,1300	41,0300	42,3300	42,8500	41,1660	-3,2698	8,6284

Tabulka 5.14 Měření půdy pod úhlem pomocí konfigurace reálného měření zemniče s náhodným zemničem před proudovou elektrodou.

U_{EPR} [kV]	4,312	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	1000/300			
l_{PE} [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
U_m [kV]	3,5988	3,5951	3,5915	3,5877	3,5837			
ΔU [kV]	0,7132	0,7169	0,7205	0,7243	0,7283			
R [Ω]	71,3200	71,6900	72,0500	72,4300	72,8300	72,0640	1,8185	-2,4614
U_{EPR} [kV]	12,3376	I [A]	10	ρ [$\Omega \cdot m$]	300/1000			
délka [m]	24,2	25,2	26,2	27,2	28,2	\bar{R} [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [Ω]	$\Delta\bar{R}$ [%]
U_m [kV]	11,9412	11,9349	11,9281	11,9204	11,9111			
ΔU [kV]	0,3964	0,4027	0,4095	0,4172	0,4265			
R [Ω]	39,6400	40,2700	40,9500	41,7200	42,6500	41,0460	-3,1498	8,3118

5.4 Relativní chyby modelů

Po zpracování měření a stanovení průměrných chyb měřením zemnicího odporu $\Delta\bar{R}$ v kapitolách 5.1, 5.2, 5.3, byla vytvořena Tabulka 5.15, ve které je vidět přehled všech chyb měření vůči skutečnému odporu zemniče. Největší chyby nastaly při simulaci skutečného měření u modelů dělených pod úhlem 30°.

Relativní chyba byla pro modely bez náhodného zemniče a s náhodným zemničem před napětřovou a proudovou elektrodou porovnávána se zemnicím odporem vůči vzdálené zemi bez náhodného zemniče. Porovnáním byly zjištěny celkové chyby, které vznikly nepřesným umístěním elektrod do země, a pro modely s náhodným zemničem navíc chyby vzniklé vlivem přítomnosti náhodného zemniče v půdě.

Pro modely s náhodným zemničem v blízkosti zemniče je sledovaná nepřesnost způsobena špatným umístěním elektrod do země a pouze zanedbatelná část chyby je tvořena vlivem náhodného zemniče v půdě.

Tabulka 5.15 Relativní chyby

		$\Delta\bar{R}$ [%]		
		Lokální nehomogenita	Horizontální půda	Půda pod úhlem
bez náhodného zemniče	1000/300	0,3796	0,1014	-2,4939
	300/1000	-0,1157	1,0498	7,2088
náhodný zemnič za zemničem	1000/300	0,1352	-0,2452	-3,4267
	300/1000	-0,7873	0,9706	6,8514
náhodný zemnič před U elektrodou	1000/300	-0,0679	0,9706	-2,2015
	300/1000	-0,9791	0,9706	8,6284
náhodný zemnič před I elektrodou	1000/300	0,607	-0,7437	-2,4614
	300/1000	2,2932	1,8451	8,3118

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit modely půdy s odlišnými vlastnostmi v programu Ansys Electronics, provést simulaci měření a následně stanovit odpor zemniče měřením. Poté porovnat hodnoty odporu získané měřením vůči skutečnému odporu zemniče, určit relativní chybu jednotlivých modelů a tyto chyby mezi sebou porovnat. Bakalářská práce ukazuje možné situace, s kterými se v praxi lze ojediněle setkat a nevědomky se dopustit nepřesného měření odporu zemniče.

U modelů s lokální nehomogenitou bylo měření s rovnoběžným umístěním napěťové a proudové elektrody velmi přesné a relativní chyba se pohybovala v rozmezí 0,07 – 0,98%, kromě případu při poměru $\rho=300/1000$ (lokální nehomogenita $1000 \Omega \cdot m$), kdy před proudovou elektrodou byl v nehomogenitě uložen náhodný zemnič, který výrazně ovlivnil měření a vznikla chyba 2,29 %. Méně přesným měřením při stejném poměru bylo měření v kolmém směru napěťovou elektrodou, kde docházelo k relativní chybě až 6,93 %, viz Tabulka 5.3. Tato chyba byla především způsobena výběrem místa pro měřicí napěťovou elektrodu ve velké vzdálenosti od lokální nehomogenity, takže měření probíhalo prakticky pouze v homogenní půdě bez vlivu lokální nehomogenity na měření. V praxi k takovému případu běžně dochází.

Při měření v půdě rozdělené pod úhlem 30 stupňů byla přesnost měření v kolmém směru ovlivněna umístěním napěťové elektrody přesně mezi dvě vrstvy půdy, tudíž relativní chyba pro oba poměry se pohybuje v mezích 5,31 – 5,87 % v modelu bez náhodného zemniče, viz Tabulka 5.11. U modelů, kde se nachází náhodný zemnič, který též částečně ovlivňuje měření, je relativní chyba v mezích 6,26 – 6,92 %, viz Tabulka 5.12.

Ze tří modelů půdy, které tato práce obsahuje, je nejpřesnější měření prováděno v horizontálně dělené půdě, kde jsou dvě homogenní půdy nad sebou a přesnost je ovlivněna pouze nepřesným rozmístěním elektrod a vlivem náhodného zemniče. Velmi přesné je i měření pro model s lokální nehomogenitou, pokud je měření prováděno směrem k nehomogenitě. Měření pro poslední model s půdou dělenou pod úhlem 30 stupňů je narozdíl od ostatních velice nepřesné, což je ovlivněno především měřením ve vrstvě, která tvoří pouze 1/6 celkového modelu půdy. Tabulka 5.15 obsahuje relativní chyby pro všechny modely s jejich specifickým nastavením.

Z provedených simulací tak lze konstatovat, že při provádění skutečného měření odporu uzemnění 4 - pólovou metodou v případech různě nehomogenních půd, nebo v přítomnosti náhodného zemniče, mohou výsledky takového měření dosahovat rozdílů až cca 7 % od skutečného odporu uzemnění měřeného zemniče.

LITERATURA

- [1] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,* " in IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015), vol., no., pp.1-226, 15 May 2015, doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078.
- [2] *METHODOLOGY AND TECHNOLOGY FOR POWER SYSTEM GROUNDING.* Solaris South Tower, Singapore 138628: John Wiley & Sons Singapore Pte., 2013. ISBN 9781118254950.
- [3] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen and A. Castanheira, "*The Complex Ground Return Plane a Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return,*" in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 8, pp. 3686-3693, Aug. 1981, doi: 10.1109/TPAS.1981.317011.
- [4] *ČSN EN 50522. Uzemňování elektrických instalací AC nad 1kV.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] *Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn: PNE 33 3300-1.* Prosinec 2017. Biskupský dvůr 1148/5, 110 00 Praha 1: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [6] Dawalibi, F. *Transmission-line grounding. Volume 1.* Final report. [*Simulations using LINPA, PATHS, or GTOWER computer codes*]. United States. <https://doi.org/10.2172/6675778>
- [7] Wenner, F., United States. National Bureau of Standards. (1916). *A method of measuring earth resistivity.* [Washington, D.C.: U.S. Dept. of Commerce, Bureau of Standards.
- [8] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN isbn978-80-01-04935-8.
- [9] M. Nayel, B. Lu, Y. Tian and Y. Zhao, "*Study of Soil Resistivity Measurements in Vertical Two-Layer Soil Model,*" 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/APPEEC.2012.6307337.
- [10] *Ansys® Electronics Desktop,* Release 2021 R1, help system, ANSYS, Inc.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symboly:

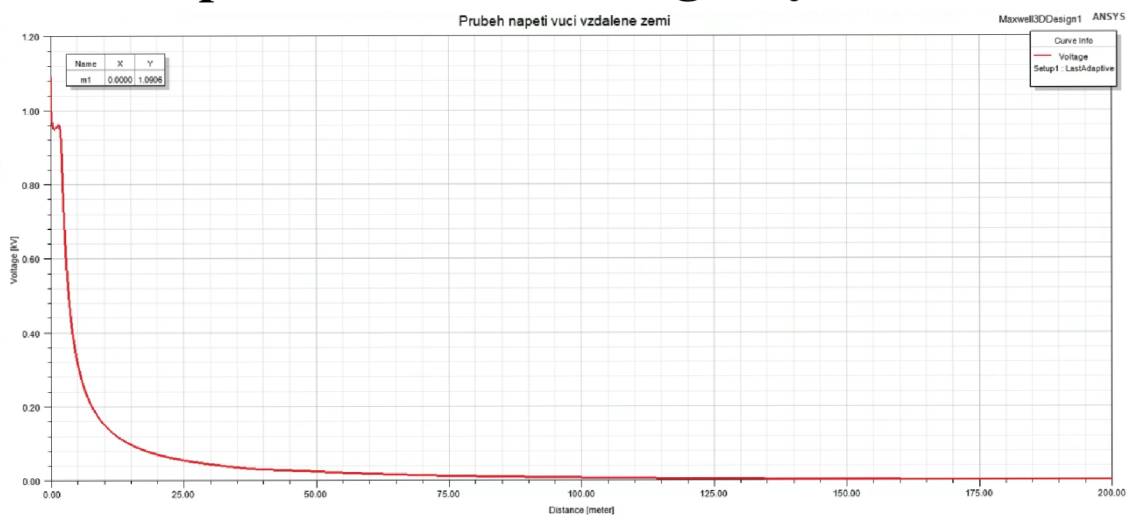
ΔR	odpor vnesený spodní vrstvou zeminy	(Ω)
a	vzdálenost mezi elektrodami	(m)
D	průměr plné desky	(m)
d	průměr	(m)
E	intenzita elektrického pole	(V/m)
G	vodivost	(S/m)
h	hloubka	(m)
I	proud	(A)
I_m	naměřená hodnota proudu	(A)
k	potenciálový koeficient	(Ω)
l	délka	(m)
l_{PE}	vzdálenost potenciálové elektrody	(m)
r	poloměr elektrody	(m)
\bar{R}	průměrná hodnota odporu uzemnění	(Ω)
R	zemní odpor	(Ω)
r_{CE}	omezovací koeficient vedení pro elektrodu CE	(-)
s	délka kroku	(m)
U	napětí mezi povrchem a místě o vzdálenosti x	(V)
U_0	celkové napětí	(V)
U_{dot}	dotykové napětí	(V)
U_{EPR}	nárůst napěťového potenciálu země	
U_{kmax}	maximální krokové napětí	(V)
U_k	krokové napětí	(V)
U_m	naměřená hodnota napětí	(V)
v	potenciál bodu	(V)
V	potenciál	(V)
x	vzdálenost od středu polokoule	(m)
η	koeficient využití soustavy	(-)
ρ	rezistivita půdy	(Ω m)
σ	proudová hustota	(A/m ²)

SEZNAM PŘÍLOH

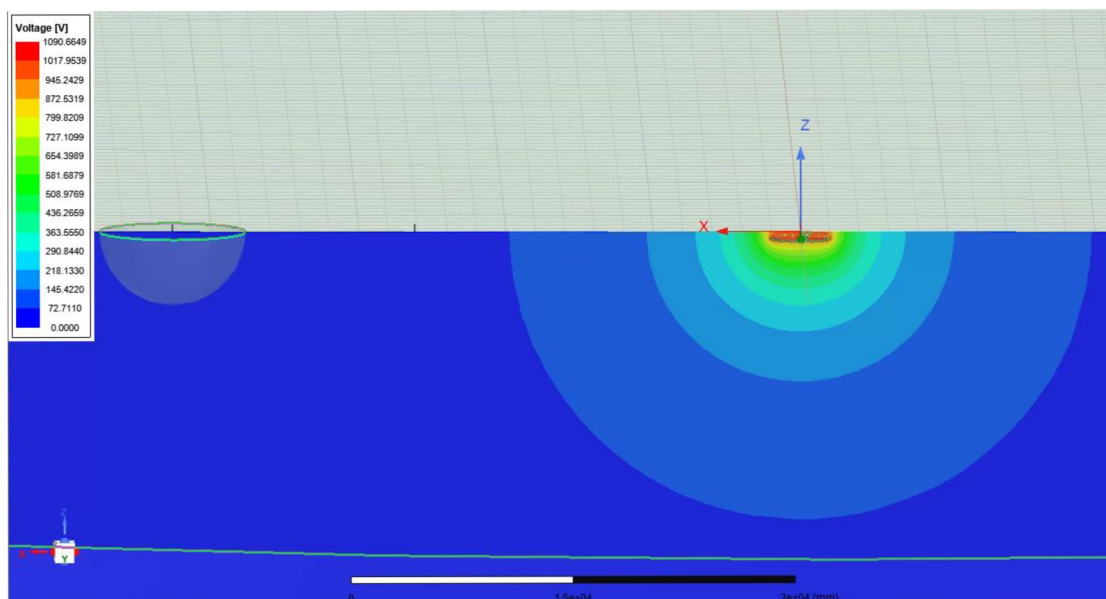
PŘÍLOHA A - HOMOGENNÍ PŮDA S NEHOMOGENITOU	60
PŘÍLOHA B - HOMOGENNÍ PŮDA S NEHOMOGENITOU A NÁHODNÝM ZEMNIČEM	65
PŘÍLOHA C - HORIZONTÁLNĚ DĚLENÁ PŮDA	74
PŘÍLOHA D - HORIZONTÁLNĚ DĚLENÁ PŮDA S NÁHODNÝM ZEMNIČEM.....	74
PŘÍLOHA E - PŮDA ROZDĚLENÁ POD ÚHLEM 30°.....	74
PŘÍLOHA F - PŮDA ROZDĚLENÁ POD ÚHLEM 30° S NÁHODNÝM ZEMNIČEM.....	74

Příloha A - Homogenní půda s nehomogenitou

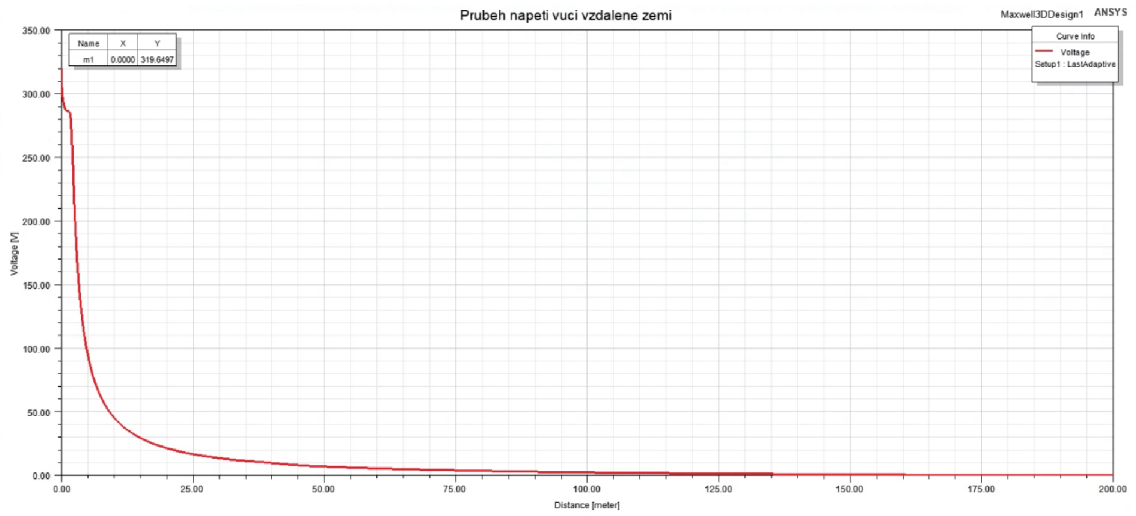
A.1 Průběh napětí vůči vzdálené zemi pro hodnotu nehomogenity $300 \Omega \cdot m$



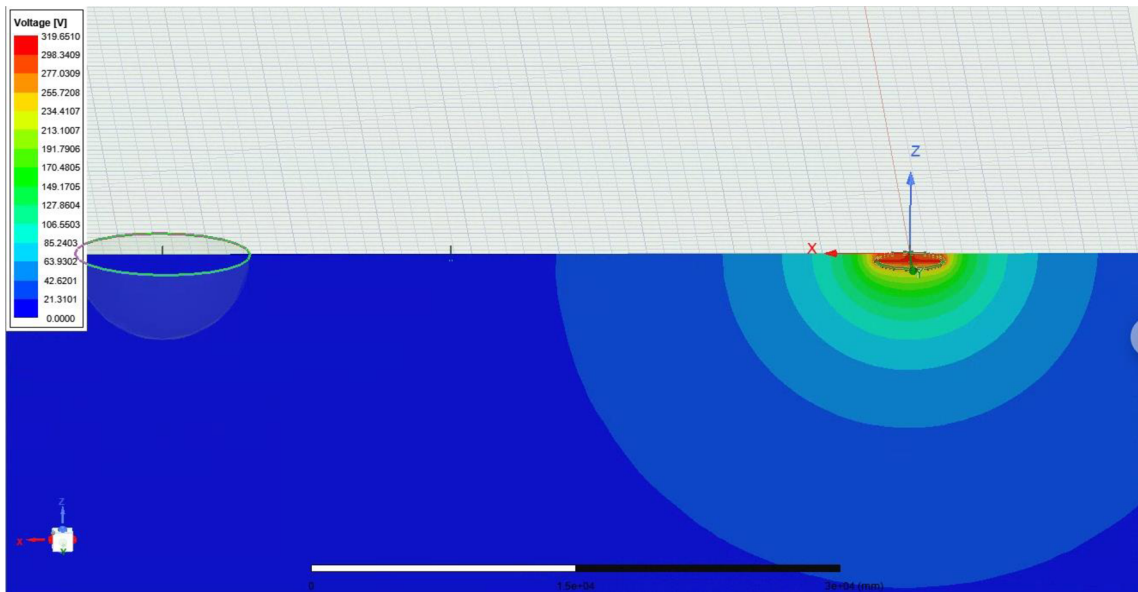
A.2 Napět'ové pole pro nehomogenitu $300 \Omega \cdot m$



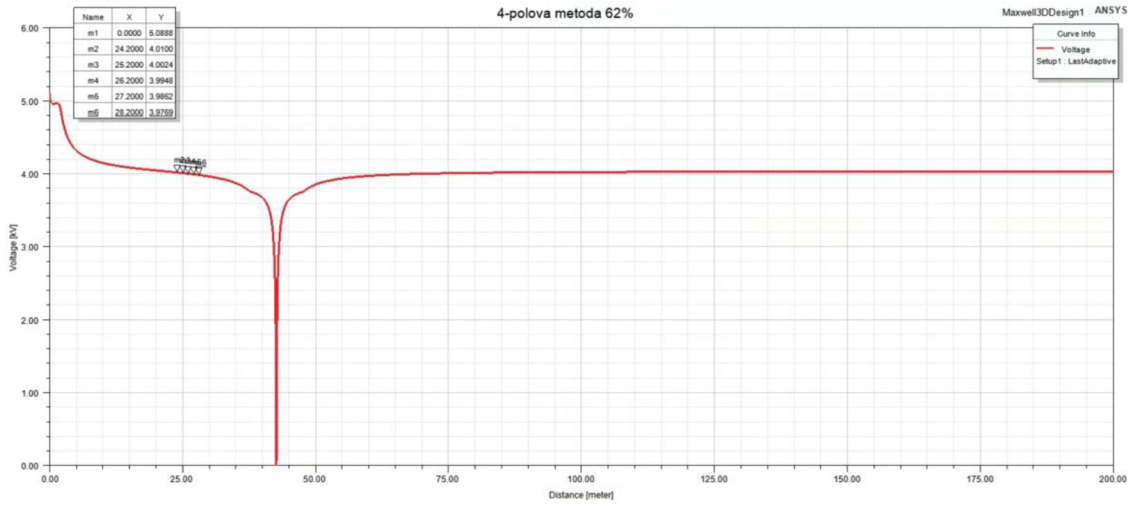
A.3 Průběh napětí vůči vzdálené zemi pro hodnotu nehomogenity $1000 \Omega \cdot m$



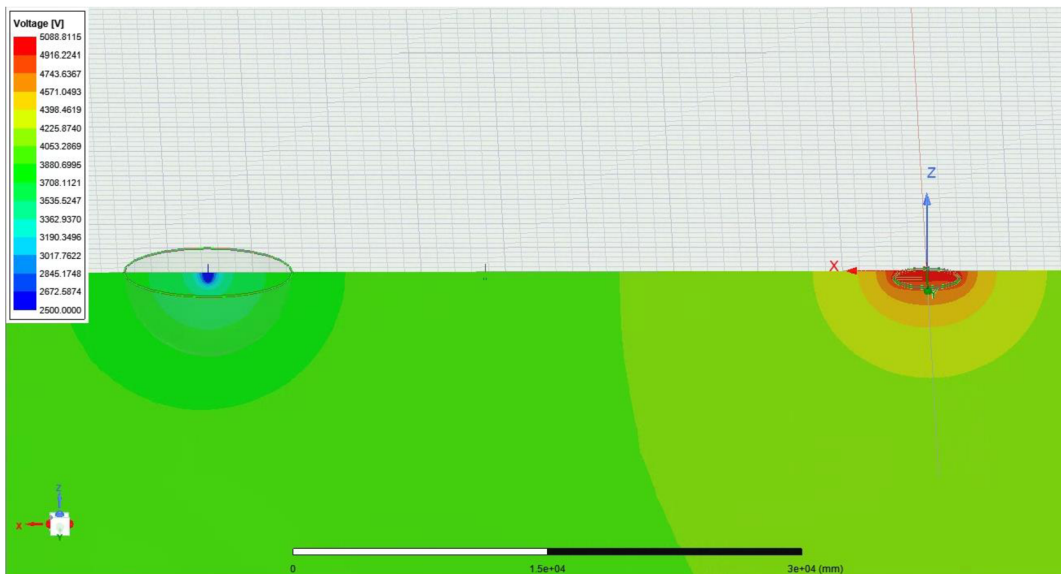
A.4 Napět'ové pole pro nehomogenitu $1000 \Omega \cdot m$



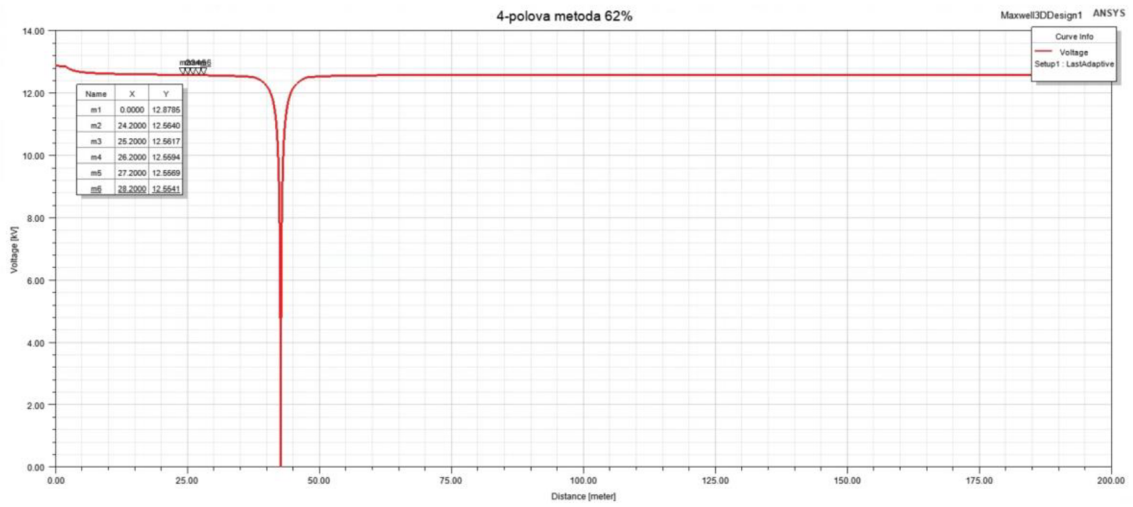
A.5 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $300 \Omega \cdot m$



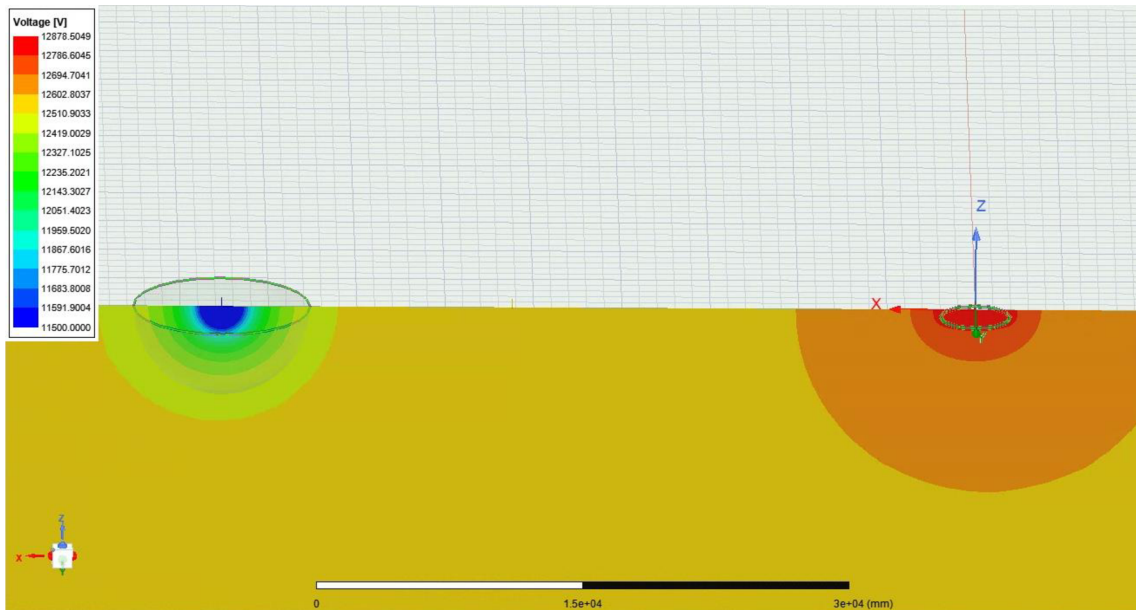
A.6 Napět'ové pole pro nehomogenitu $300 \Omega \cdot m$



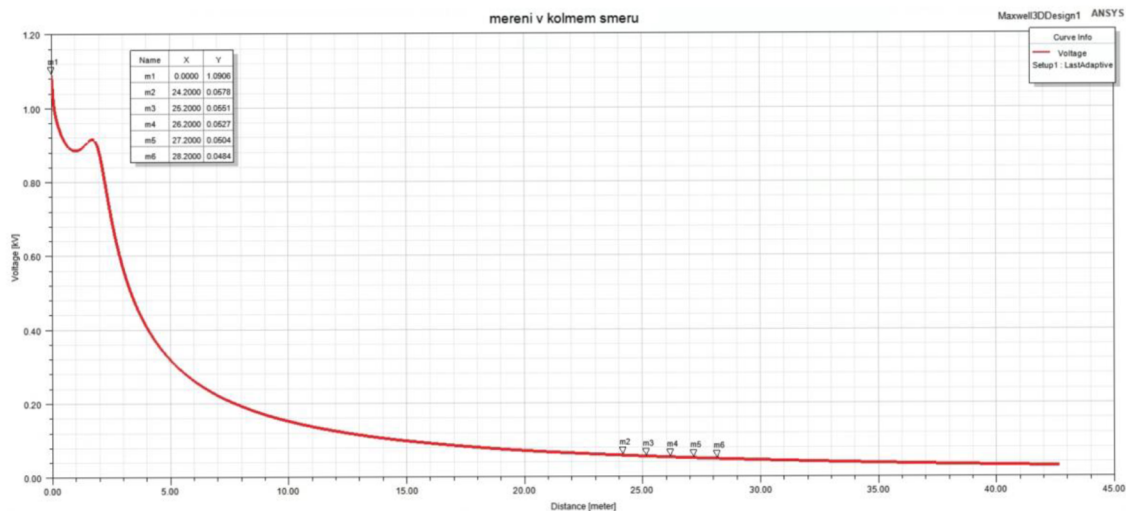
A.7 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $1000 \Omega \cdot m$



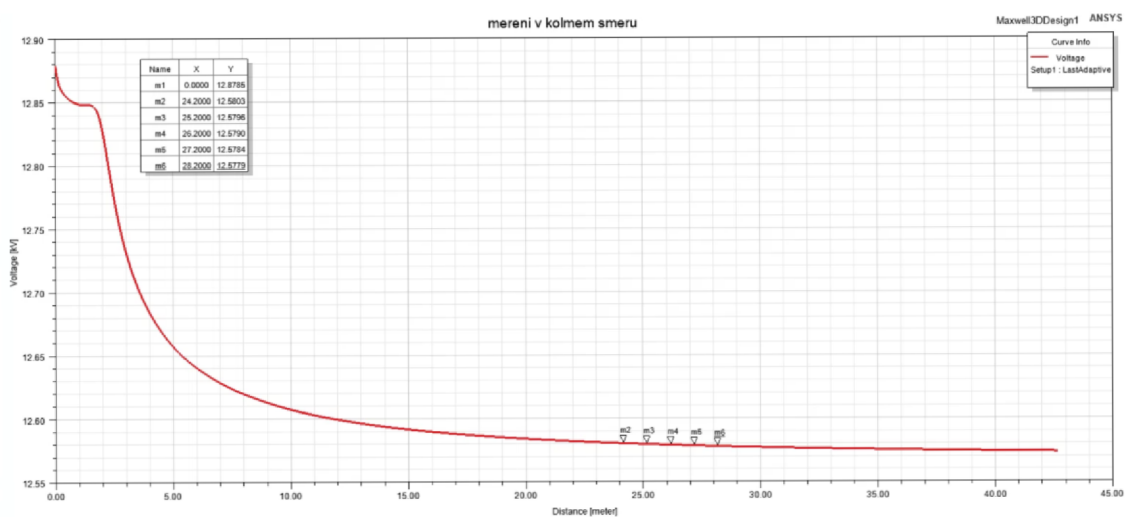
A.8 Napět'ové pole pro nehomogenitu $1000 \Omega \cdot m$



A.9 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $300 \Omega \cdot m$ a měření v kolmém směru

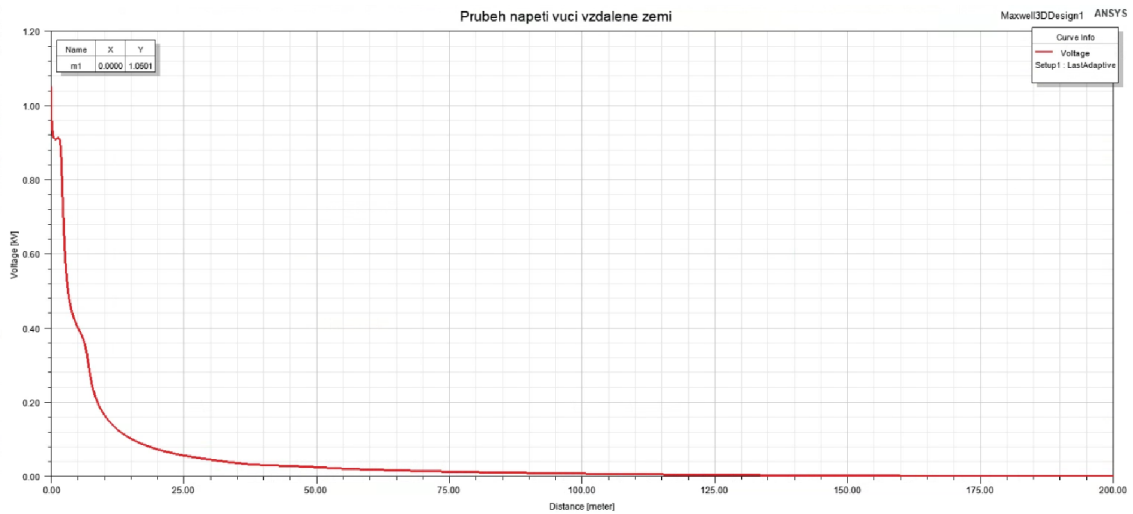


A.10 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $1000 \Omega \cdot m$ a měření v kolmém směru

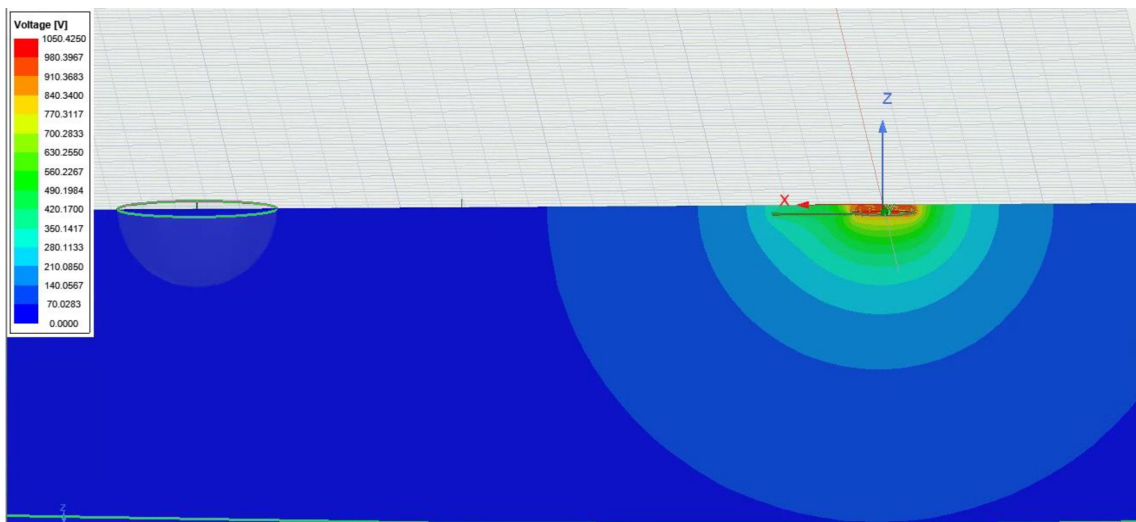


Příloha B - Homogenní půda s nehomogenitou a náhodným zemničem

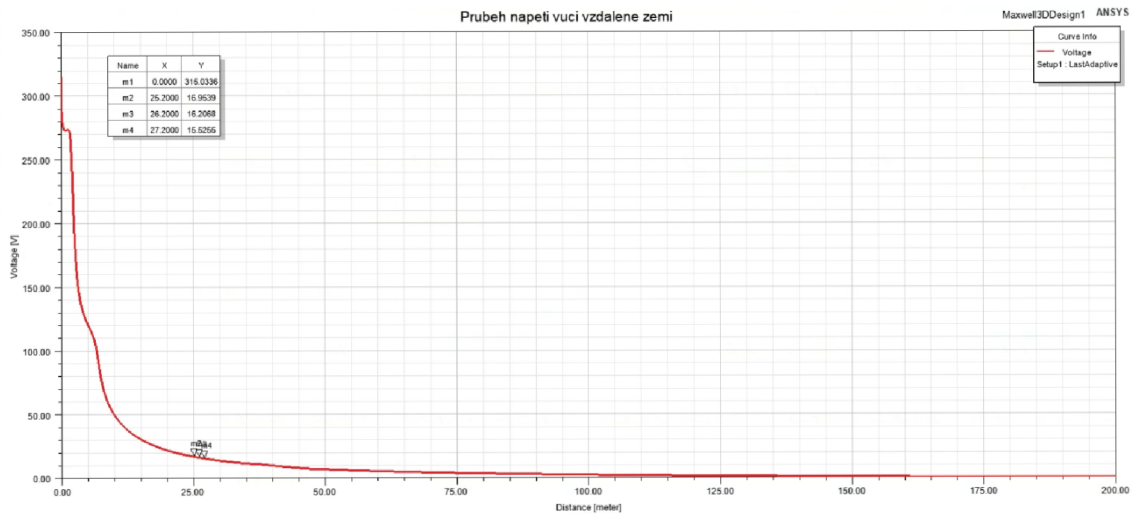
B.1 Průběh napětí vůči vzdálené zemi pro hodnotu nehomogenity $300 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem v blízkosti zemniče



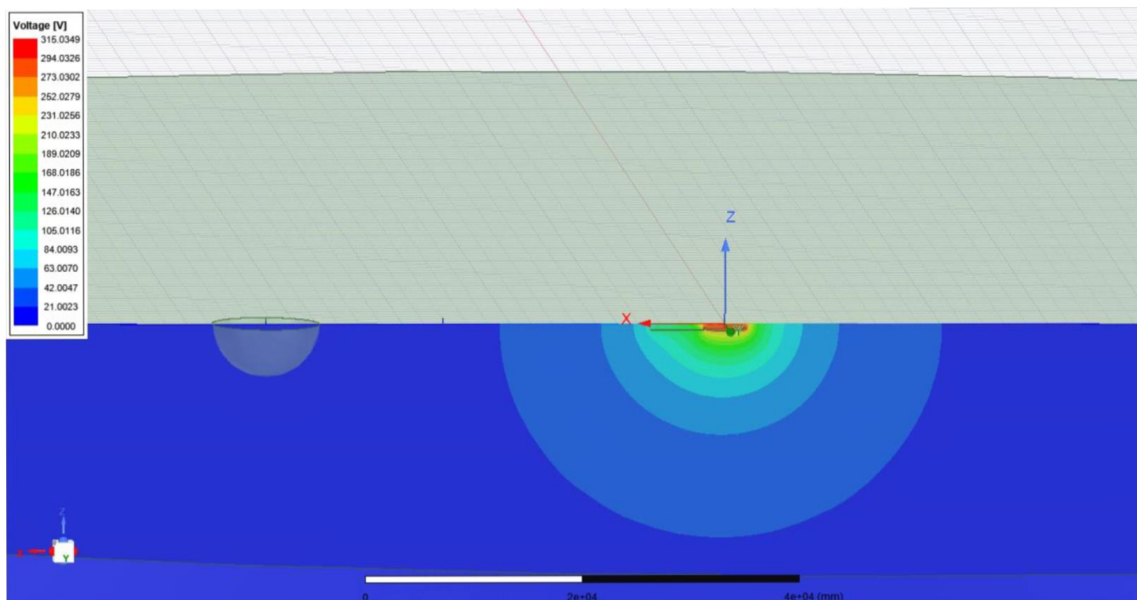
B.2 Napět'ové pole pro nehomogenitu $300 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem v blízkosti zemniče



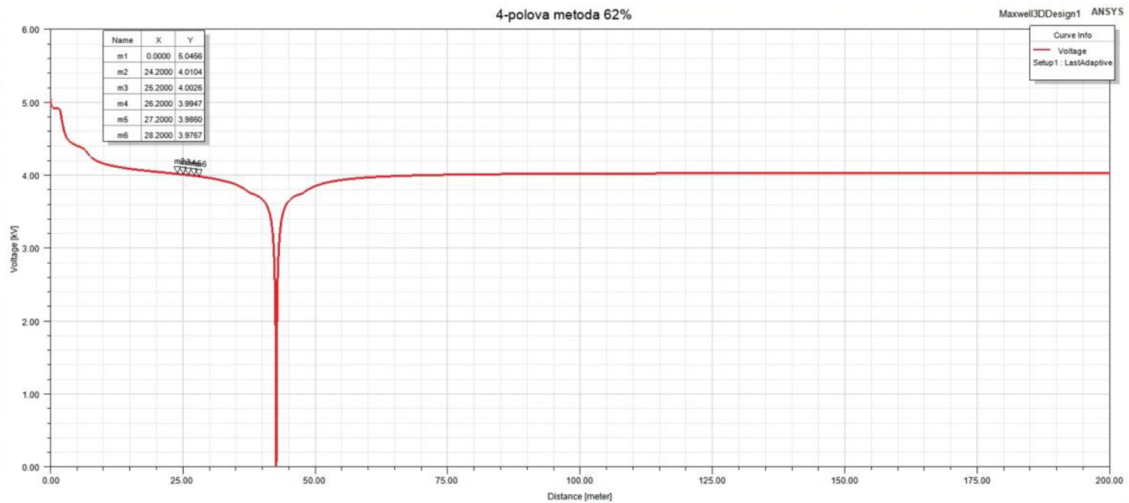
B.3 Průběh napětí vůči vzdálené zemi pro hodnotu nehomogenity $1000 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem v blízkosti zemniče



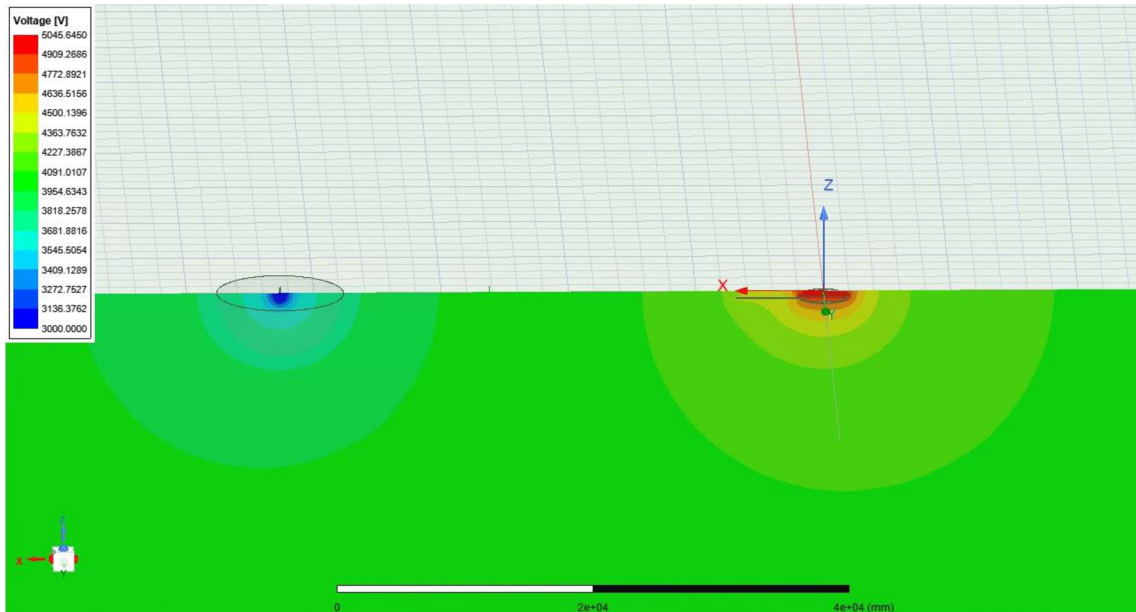
B.4 Napět'ové pole pro nehomogenitu $1000 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem v blízkosti zemniče



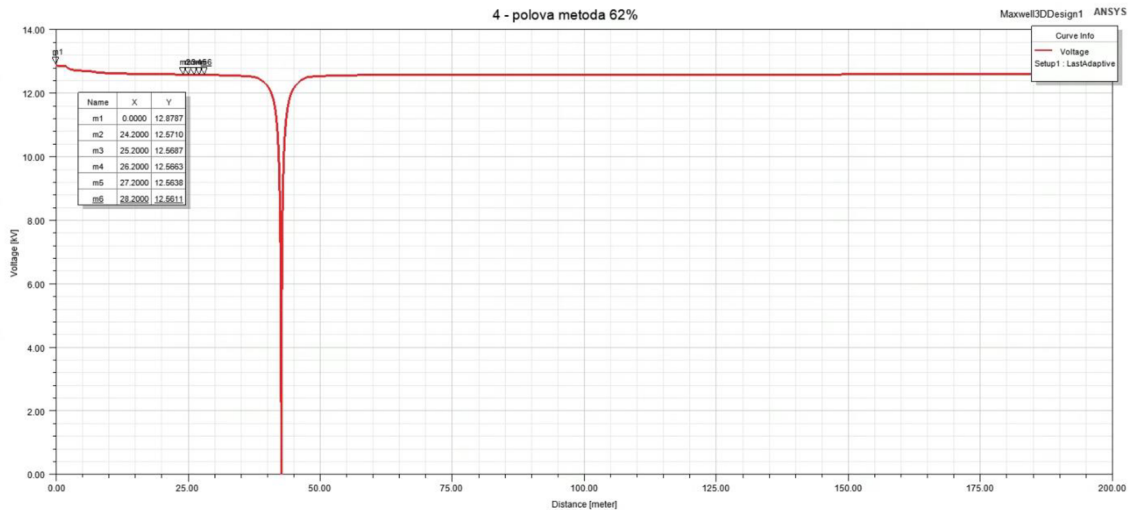
B.5 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $300 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem v blízkosti zemniče



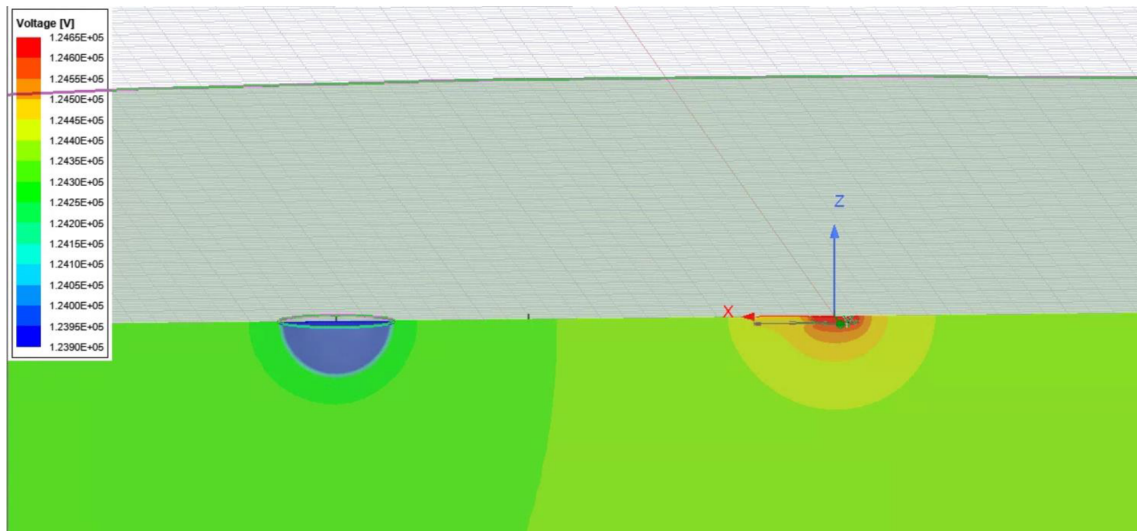
B.6 Napěťové pole pro nehomogenitu $300 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem v blízkosti zemniče



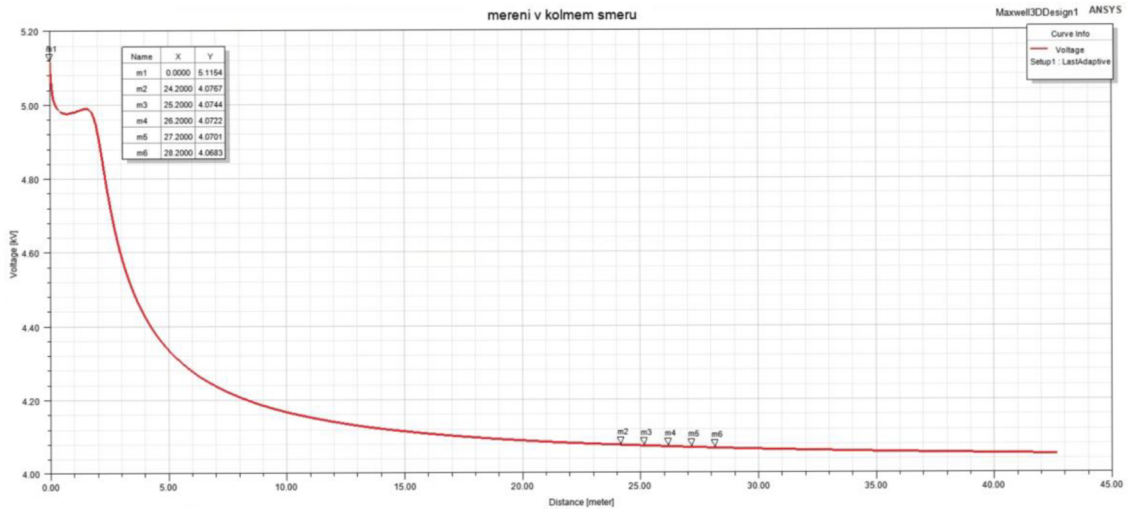
B.7 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $1000 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem v blízkosti zemniče



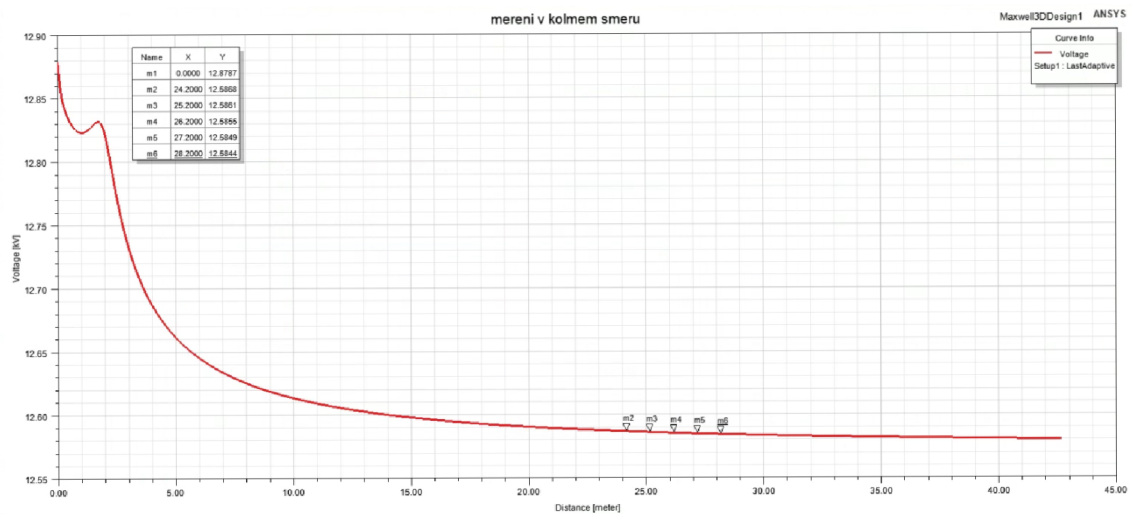
B.8 Napět'ové pole pro nehomogenitu $1000 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem v blízkosti zemniče



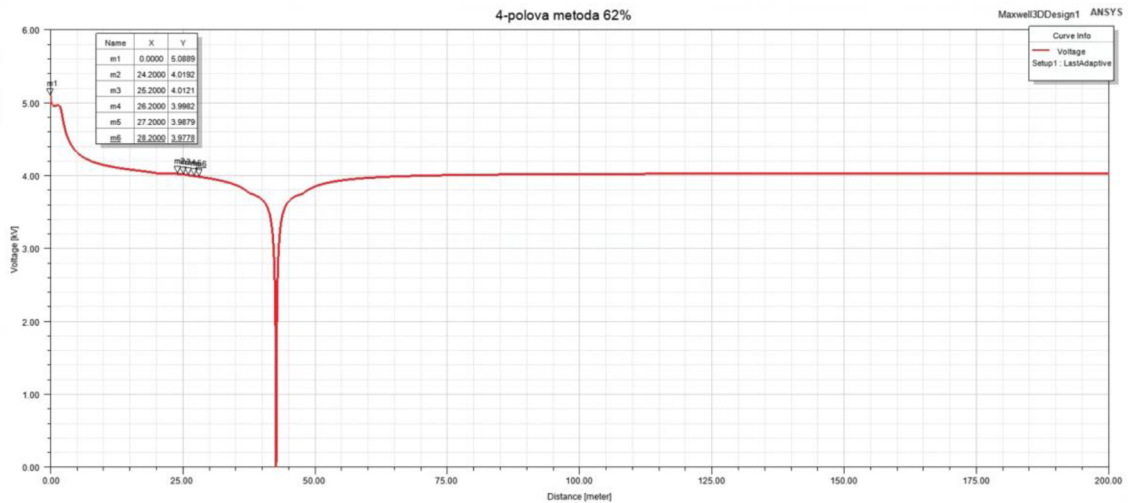
B.9 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $300 \Omega \cdot m$ a měření v kolmém směru



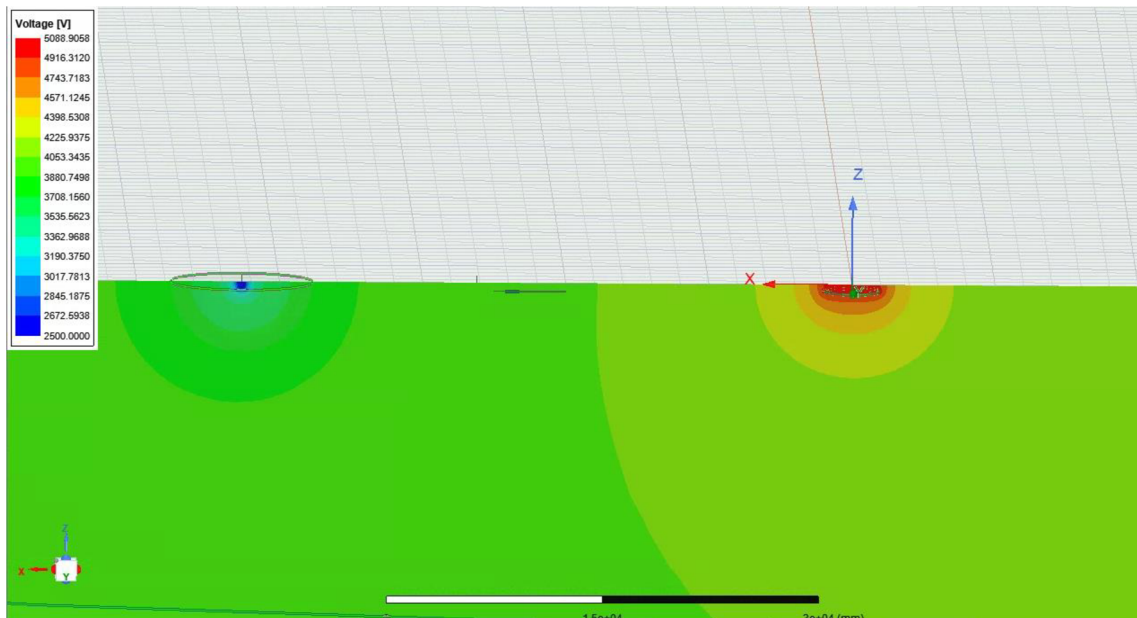
B.10 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $1000 \Omega \cdot m$ a měření v kolmém směru



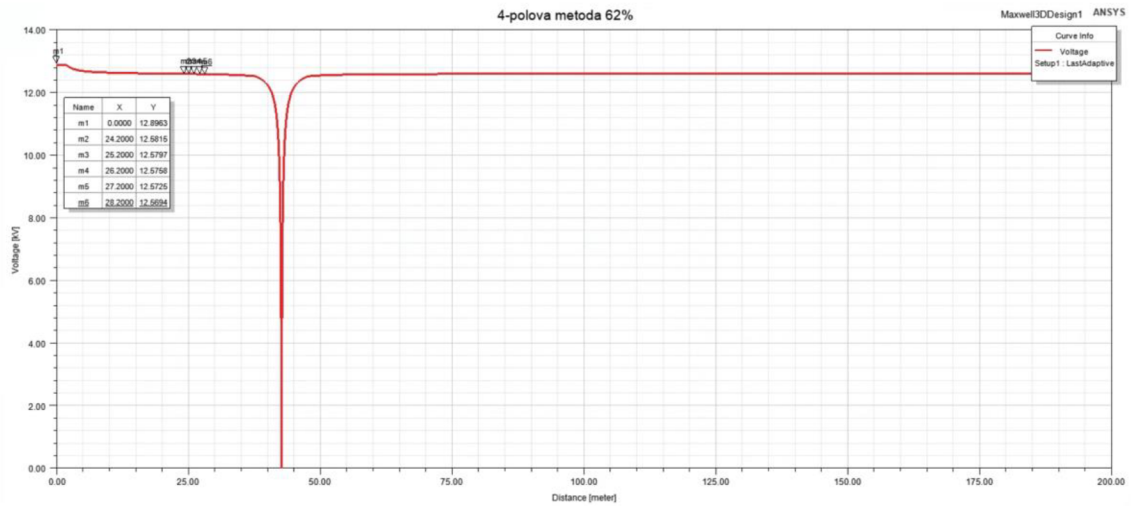
B.11 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $300 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem před U elektrodou



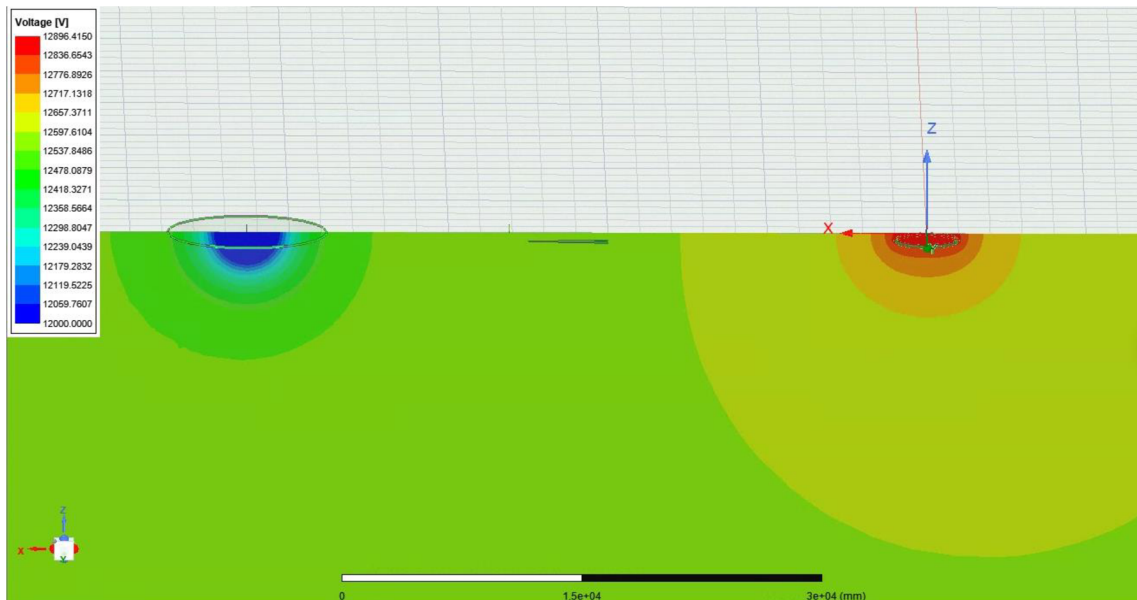
B.12 Napěťové pole pro nehomogenitu $300 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem před U elektrodou



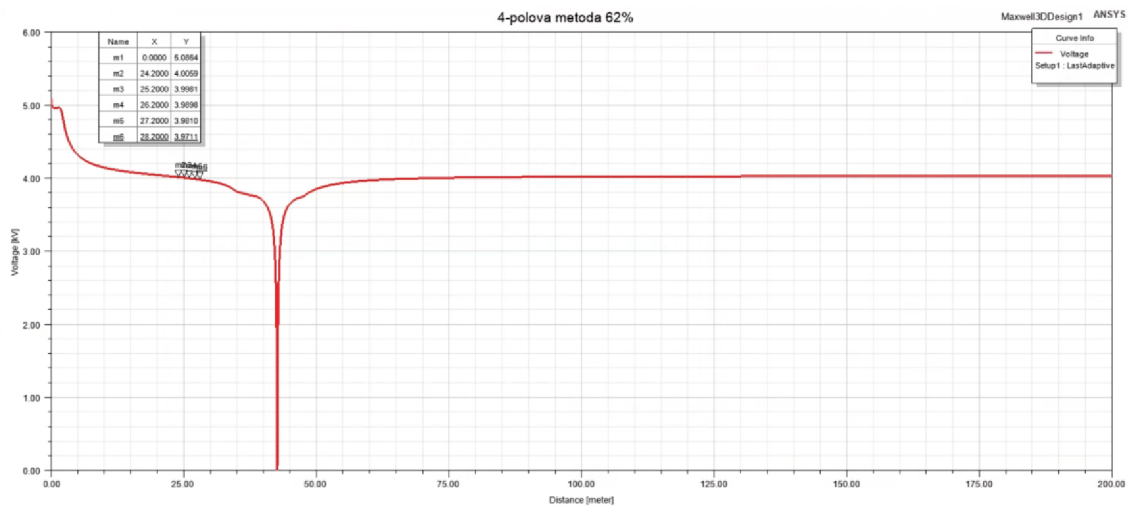
B.13 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $1000 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem před U elektrodou



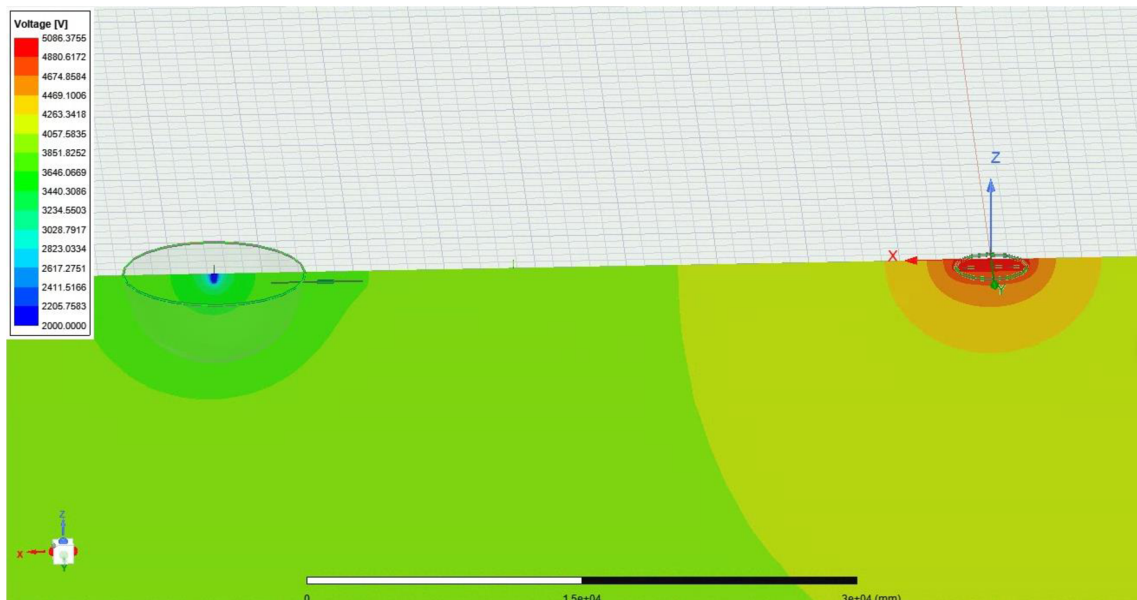
B.14 Napět'ové pole pro nehomogenitu $1000 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem před U elektrodou



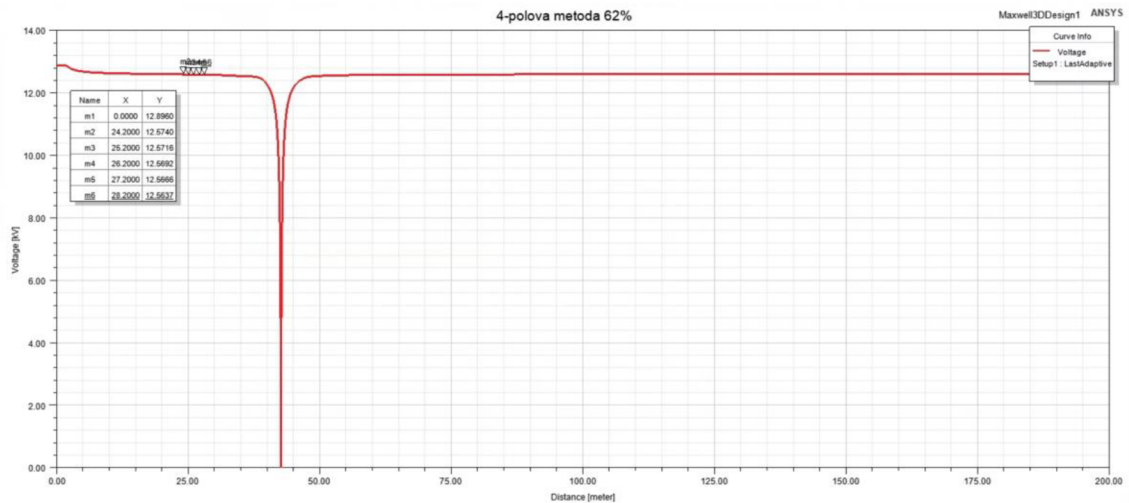
B.15 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $300 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem před I elektrodou



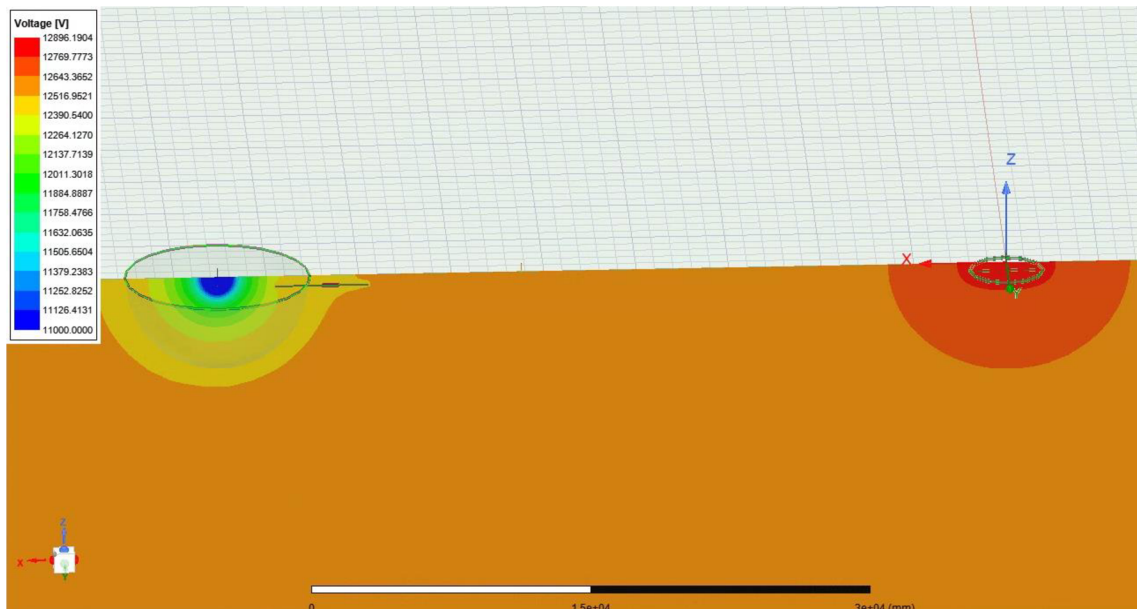
B.16 Napět'ové pole pro nehomogenitu $300 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem před I elektrodou



B.17 Průběh napětí pro proud jdoucí do elektrody s nehomogenitou $1000 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem před I elektrodou



B.18 Napět'ové pole pro nehomogenitu $1000 \Omega \cdot m$ a náhodným zemničem před I elektrodou



Příloha C - Horizontálně dělená půda

**Příloha D - Horizontálně dělená půda
s náhodným zemničem**

Příloha E - Půda rozdělená pod úhlem 30°

**Příloha F - Půda rozdělená pod úhlem 30°
s náhodným zemničem**

Tyto přílohy jsou vloženy jako samostatná příloha k této bakalářské práci v dalších souborech.