



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

HODNOCENÍ ZEMNÍCÍCH SOUSTAV VN/NN SÍTÍ

EVALUATION OF MV/LV NETWORK EARTHING SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Sítař

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Kopička

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Martin Sítař

ID: 155235

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Hodnocení zemních soustav VN/NN sítí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Definování testovacího měření vybrané uzemňovací soustavy (návrh postupu měření, měřené parametry, zapojení měřícího pracoviště)
2. Provedení reálného měření a jeho vyhodnocení
3. Tvorba modelu měřené uzemňovací soustavy
4. Porovnání a vyhodnocení simulací a naměřených/vypočítaných hodnot, zhodnocení kvality měřené uzemňovací soustavy

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 22.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Marek Kopička

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

Bibliografická citace mé práce:

SÍTAŘ, M. Hodnocení zemních soustav VN/NN sítí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 73 s.
Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Kopička.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 následujícího 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.

Touto cestou bych chtěl zároveň poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Marku Kopičkovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky, Ing. Václavu Vyčítalovi za pomoc v programu ANSYS Maxwell, Ing. Martinu Ježkovi a Ing. Lukáši Čejkovi, ze společnosti E.ON, za ochotu a výpomoc při hledání vhodného místa pro měření.

.....

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou měření zemnicích soustav VN/NN sítí, které v praxi představují především zemnicí soustavy distribučních trafostanic a stožárů s úsekovými odpínači. Zkoumá problematiku a zásady pro měření parametrů důležitých z hlediska ochrany osob a zvířat před úrazem při dotyku neživých částí, ochrany elektrických strojů a zařízení před účinky velkých proudů a přepětí a zároveň správnou funkčnost připojených elektrických zařízení. Mezi tyto parametry patří rozložení potenciálu povrchu země, zemní odpor, rezistivita půdy, dotyková a kroková napětí a přenos nebezpečného potenciálu do sítě NN.

Cílem práce je příprava, rozbor a následné vyhodnocení reálných měření v praxi. Tato měření zemnicí soustavy probíhala u distribuční stanice a betonového sloupu s úsekovým odpínačem. Pro tento betonový sloup byl následně vytvořen numerický model zemnicí soustavy v programu ANSYS. Následná evaluace výsledků, jak z pohledu numerického (porovnání měření a simulovaných výsledků), tak z pohledu analytického (soulad výsledků měření s normou), je včetně numerického modelu zemnicí soustavy řešena v praktické části diplomové práce.

KLÍČOVÁ SLOVA: Uzemňovací soustava; distribuční transformovna; rozložení potenciálu; zemní odpor; rezistivita půdy; dotykové napětí; krokové napětí; přenos potenciálu

ABSTRACT

This master's thesis deals with the measurement of grounding systems in HV/LV distribution networks, which includes grounding system of distribution substation and transmission lines. Explores the issue and principles for the measurement of parameters, which are important for the protection of persons and animals in order not to touch exposed conductive part accidentally, protection of electrical machines and equipment against high fault current and dangerous surges while the correct function of the connected electrical equipment is maintained. These parameters include earth potential rise, ground resistance, soil resistivity, touch voltage, step voltage and transferred potential to the LV network.

The aim of this work is the preparation, analysis and subsequent evaluation for the real measurement in practice. These earthing-system measurements were carried out at the distribution station and the concrete pole with a section disconnecter. Then a numerical model of the grounding system of concrete pole was created in ANSYS. Subsequent evaluation of the results as numerical terms (comparison measurements and simulated results) and evaluation in terms of analytical (measurement results compliance with the standard) including the numerical model of the earthing system is solved in the practical part of the master's thesis.

KEY WORDS: Grounding systems; distribution substation; soil resistivity; earth potential rise; ground resistance; touch and step voltage; transferred potential

OBSAH

ABSTRAKT	4
ABSTRACT	5
OBSAH.....	6
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	13
2 TEORIE UZEMNĚNÍ V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH VN/NN	14
2.1 POŽADAVKY NA UZEMNĚNÍ	14
3 REZISTIVITA PŮDY.....	15
3.1 METODY MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY	16
3.1.1 WENNEROVA METODA.....	17
3.1.2 SCHLUMBERGEROVA METODA	18
3.1.3 MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY V PRAXI.....	19
4 ZEMNÍ ODPOR.....	21
4.1 METODY MĚŘENÍ ZEMNÍHO ODPORU	21
4.1.1 METODA POTENCIÁLOVÉHO SPÁDU.....	21
4.1.2 PROUDOVÁ METODA	24
4.1.3 VYSOKOFREKVENČNÍ MĚŘIČ UZEMNĚNÍ	25
4.2 VYUŽITÉ METODY V PRAXI.....	25
4.2.1 VYUŽITÍ METODY POTENCIÁLOVÉHO SPÁDU.....	25
5 DOTYKOVÁ A KROKOVÁ NAPĚTÍ	27
5.1 MĚŘENÍ DOTYKOVÉHO A KROKOVÉHO NAPĚTÍ.....	28
5.2 METODY MĚŘENÍ DOTYKOVÉHO A KROKOVÉHO NAPĚTÍ.....	29
5.2.1 PROUDOVÁ METODA	29
5.2.2 METODA VYUŽÍVAJÍCÍ UNIVERZÁLNÍHO MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE	29
5.3 POUŽITÉ METODY V PRAXI.....	30
6 PŘENOS POTENCIÁLU DO SÍTÍ NN	31
6.1 ZAVLEČENÝ POTENCIÁL ZE SOUSTAVY NAD 1 kV DO SOUSTAV NN	31
7 OBECNÉ ZÁSADY PŘI MĚŘENÍ ZEMNÍCÍCH SOUSTAV VN/NN SÍTÍ.....	33
7.1 POŽADAVKY NA MĚŘENÍ.....	33
7.2 SPECIFIKA A PROBLÉMY PŘI MĚŘENÍ V PRAXI.....	33
7.2.1 BLUDNÉ STŘÍDAVÉ PROUDY	34
7.2.2 VZÁJEMNÝ VLIV MĚŘICÍCH ELEKTROD.....	34
7.3 ZÁSADY PRO MINIMALIZACI NEPŘESNOSTÍ PŘI MĚŘENÍ.....	34
8 NUMERICKÝ MODEL ZEMNÍCÍCH SOUSTAV	36

8.1 UZEMNĚNÍ ÚSEKOVÉHO ODPÍNAČE	36
8.2 PŘÍKLAD UZEMNĚNÍ ÚSEKOVÉHO ODPÍNAČE V PRAXI	36
8.3 VSTUPNÍ PARAMETRY	37
8.4 EMPIRICKÝ VÝPOČET ZEMNÍHO ODPORU	37
8.5 VÝSLEDKY SIMULACE.....	39
8.5.1 ZEMNÍ ODPOR.....	39
8.5.2 ROZLOŽENÍ POTENCIÁLU POVRCHU ZEMĚ	39
9 MĚŘENÍ ZEMNÍCÍCH SOUSTAV V PRAXI.....	41
9.1 MĚŘENÍ ZEMNÍCÍ SOUSTAVY DTS V OBCI KLENOV	41
9.1.1 ÚVOD	41
9.1.2 MĚŘENÉ VELIČINY	41
9.1.3 FREKVENČNÍ MĚŘENÍ.....	42
9.1.4 SILOVÉ MĚŘENÍ.....	48
9.1.5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SILOVÉHO A FREKVENČNÍHO MĚŘENÍ	51
9.2 MĚŘENÍ ZEMNÍCÍ SOUSTAVY ÚSEKOVÉHO ODPÍNAČE V OBCI ČIKOV	52
9.2.1 MĚŘENÍ ZEMNÍHO ODPORU	52
9.2.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A SIMULACE ZEMNÍHO ODPORU	53
9.2.3 MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ POTENCIÁLU.....	54
9.2.4 MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY.....	57
9.2.5 MĚŘENÍ DOTYKOVÉHO A KROKOVÉHO NAPĚTÍ	59
ZÁVĚR.....	63
POUŽITÁ LITERATURA	65
SEZNAM PŘÍLOH	66
PŘÍLOHA A: MĚŘENÍ KLENOV.....	67
PŘÍLOHA B: MĚŘENÍ ČIKOV	68

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Závislost činitele K na ročním období (deštivé období – závislost 1, suché období – závislost 2) [5].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3-2 Rozložení elektrického pole v homogenní půdě (vlevo) a nehomogenní půdě (vpravo) [6]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3-3 Schéma zapojení Wennerovy metody měření rezistivity půdy [8]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3-4 Schéma zapojení Schlumbergerovy metody měření rezistivity půdy [8]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3-5 Zapojení měřicího přístroje PU193 pro měření rezistivity půdy.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-6 Schéma zapojení CPC 100 pro měření rezistivity půdy [9]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-7 Nastavení měřicího přístroje CPC 100 pro měření rezistivity půdy [9]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4-1 Metoda potenciálového spádu [7]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4-2 Závislost zdánlivého zemního odporu na vzdálenosti x [7].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4-3 Závislost zemní impedance na vzdálenosti potenciálové elektrody od testované zemnicí soustavy [11]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4-4 Měření zemního odporu uzemnění proudovou metodou [1]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4-5 Schéma měření zemnicí soustavy DTS pomocí metody potenciálového spádu [4]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 5-1 Dovolená dotyková napětí U_{Tp} pro omezené trvání průtoku proudu [13].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 5-2 Znázornění dotykového a krokového napětí v závislosti na potenciálu země [3]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5-3 Schéma zapojení pro měření dotykového a krokového napětí frekvenční metodou [11]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5-4 Schéma zapojení pro měření dotykového a krokového napětí univerzálním měřicím přístrojem [11]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 8-1 Uzemnění úsekového odpínače pomocí dvou ekvipotenciálních kruhů.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 8-2 Vstupní parametry matematického modelu zemnicí soustavy úsekového odpínače Čikov</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 8-3 Numerický model zemnicí soustavy v programu ANSYS Maxwell</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 8-4 Výsledek simulace rozložení potenciálu země ve směru B do vzdálenosti 40 m od podpěrného bodu.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 8-5 Numerický model zemnicí soustavy s naznačením směrů simulace rozložení potenciálu</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 8-6 3D graf rozložení potenciálu z výsledků simulace.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 9-1 Zjednodušené schéma experimentálního měření a zaznamenávaných veličin</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 9-2 Naznačené směry měření rozložení potenciálu země u DTS Kočí.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 9-3 Grafická závislost zemního odporu na vzdálenosti od DTS</i>	<i>43</i>

<i>Obr. 9-4 Graf rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemniče pro zemní proud 12,1 A</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 9-5 Určení dotykového napětí z grafu rozložení potenciálu země</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 9-6 Určení krokového napětí z grafu rozložení potenciálu země.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 9-7 Místo zemního spojení v DTS Kočí.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 9-8 Průběh efektivních hodnot napětí navýšení potenciálu postižené DTS U_E a zaznamenaného dotykového napětí U_T a krokového napětí U_K.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 9-9 Měření dotykového napětí na elektroměrovém rozvaděči v blízkosti postižené DTS.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 9-10 Měření krokového napětí v blízkosti postižené DTS.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 9-11 Rozmístění testovacích elektrod a měřicího přístroje (Zdroj: www.mapy.cz).....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 9-12 Grafická závislost zemního odporu v okolí zemních kruhů (nalevo) a zemního odporu (napravo) na vzdálenosti od betonového sloupu s úsekovým odpínačem</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 9-13 Rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemních kruhů (nalevo) a celkové rozložení potenciálu (napravo) v závislosti na vzdálenosti od místa měření, pro $I_{RES} = 8,5 A$</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 9-14 Naznačení směrů umístění napěťových elektrod pro měření zemního odporu a rozložení potenciálu země</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 9-15 Graf simulace a měření rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemních kruhů v přímce PO1 pro reálný numerický model.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 9-16 Graf simulace a měření rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemních kruhů v přímce PO1 pro upravený numerický model.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 9-17 Zaznačená místa pro měření rezistivity půdy v okolí testovaného zemniče</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 9-18 Určení dotykového napětí z grafu rozložení potenciálu země</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 9-19 Určení krokového napětí z grafu rozložení potenciálu země.....</i>	<i>61</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3-1 Střední hodnoty rezistivity půd [3]</i>	15
<i>Tab. 3-2 Konfigurační konstanta k [1]</i>	18
<i>Tab. 3-3 Hodnoty koeficientů pro měření rezistivity půdy [8]</i>	18
<i>Tab. 6-1 Minimální požadavky pro vzájemné propojení uzemňovacích soustav NN a VN vycházející na mezích nárůstu potenciálu země [3]</i>	32
<i>Tab. 9-1 Měření dotykového napětí v okolí DTS pro poruchový zemní proud 12,1 A</i>	45
<i>Tab. 9-2 Hodnoty dotykového napětí určené z grafu rozložení potenciálu země</i>	46
<i>Tab. 9-3 Měření krokového napětí v okolí DTS pro zemní poruchový proud 12,1 A</i>	46
<i>Tab. 9-4 Hodnoty krokového napětí určené z grafu rozložení potenciálu země</i>	47
<i>Tab. 9-5 Tabulka zaznamenaných veličin při simulaci kovového zemního spojení (test 1)</i>	48
<i>Tab. 9-6 Porovnání výsledků silového a frekvenčního měření pro referenční zemní proud 12,1 A</i>	51
<i>Tab. 9-7 Výsledné hodnoty zemního odporu</i>	53
<i>Tab. 9-8 Tabulka naměřených hodnot z měření rezistivity půdy pro hloubky 1 a 2 m</i>	57
<i>Tab. 9-9 Tabulka naměřených hodnot z měření rezistivity půdy pro hloubky 3, 5 a 10 m</i>	58
<i>Tab. 9-10 Měření dotykového napětí v místě táhla úsekového odpínače pro $I_{RES}=8,5$ A</i>	59
<i>Tab. 9-11 Hodnoty krokového napětí určené z grafu rozložení potenciálu země</i>	62

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Význam	Jednotka
Z_{DTS}	Celková impedance uzemňovací soustavy DTS	Ω
Z, Z_E	Zemní impedance	Ω
U_T	Dotykové napětí	V
U_{Tm}	Naměřená hodnota dotykové napětí	V
U_{Tp}	Dovolená hodnota dotykové napětí	V
$U_{Tf\text{frekv.}}$	Naměřená hodnota dotykového napětí pomocí frekvenčního měření	V
$U_{T\text{silové.}}$	Naměřená hodnota dotykového napětí pomocí silového měření	V
U_K	Krokové napětí	V
$U_{Kf\text{frekv.}}$	Naměřená hodnota krokového napětí pomocí frekvenčního měření	V
$U_{K\text{silové.}}$	Naměřená hodnota krokového napětí pomocí silového měření	V
U_m	Naměřená hodnota napětí	V
$U_{V\text{-metr}}$	Naměřená hodnota napětí selektivním (frekvenčním) voltmetrem	V
ΔU	Napětí naměření mezi napěťovými elektrodami	V
U_E	Napětí navýšení potenciálu země (EPR)	V
U_{Emax}	Maximální napětí navýšení potenciálu země	V
U_{Ex}	Napětí navýšení potenciálu země v určité vzdálenosti od zemnicí soustavy	V
t_F	Doba trvání poruchy	s
t_{vyp}	Doba vypnutí poruchy	s
ρ_E	Měrný odpor (rezistivita) půdy	Ωm
ρ_1	Rezistivita vrchní vrstvy půdy	Ωm
ρ_2	Rezistivita spodní vrstvy půdy	Ωm
R	Naměřená (vypočtená) hodnota odporu	Ω
R_A	Odpor uzlu soustavy (uzel transformátoru)	Ω
R_{BODY}	Odpor lidského těla	Ω
R_E	Zemní odpor	Ω
$R_{E,\text{měř}}$	Naměřená hodnota zemního odporu	Ω
$R_{E,\text{sim}}$	Simulovaná hodnota zemního odporu	Ω
$R_{EV,\text{min}}$	Minimální vypočtená hodnota zemního odporu	Ω
$R_{EV,\text{max}}$	Maximální vypočtená hodnota zemního odporu	Ω
S	Průřez vodiče	mm^2
S_{DTS}	Plocha uzemňovací soustavy DTS	m^2
a	Vzdálenost mezi elektrodami	m
I	Proud protékající proudovými elektrodami	A
I_M	Měřicí (testovací) proud	A
I_{OUT}	Výstupní proud z měřicího systému	A

I_C	Kapacitní proud soustavy	A
I_{RES}	Zbytkový (reziduální) zemní proud	A
K	Činitel rezistivity půdy	-
k	Konfigurační konstanta	-
F	Konstanta respekt. vliv klimatických podmínek rezistivity půdy	-
r	Redukční činitel vedení	-
k	Konfigurační konstanta	-
F	Konstanta respekt. vliv klimatických podmínek rezistivity půdy	-
r	Redukční činitel vedení	-
Označení	Význam	
$P1, P2$	Potenciálové (napět'ové) elektrody	
$C1, C2$	Proudové elektrody	
E	Testovaná (zemnicí) elektroda	
PEN	Ochranný vodič s funkcí vodiče nulového	
DTS	Distribuční trafostanice	
DT	Distribuční transformátor	
OM	Odběrné místo	
HDS	Hlavní domovní skříň	
ZS	Zemní spojení	
PPF	Automatika přizemnění postižené fáze	
$ČSN$	Česká technická norma	
PNE	Podnikové normy energetiky	
TNS	Technické normy společnosti	
IEC	Internacional Electrotechnical Comission	

1 ÚVOD

Problematiku uzemnění VN/NN sítí představují především zemnicí soustavy distribučních trafostanic. Jejich neustálý rozvoj vyžaduje kromě bezpečnosti osob uvnitř a v okolí dané distribuční trafostanice také přísné nároky na funkčnost všech zařízení a přístrojů, které zajišťují nepřetržitou dodávku elektrické energie až ke koncovému odběrateli.

U nově zřízených zemnicích soustav distribučních trafostanic či stožárů s úsekovými odpínači je nutné provést měření zemního odporu jako celku. Dle normy PNE 33 0000-1 jsou kladeny specifické požadavky na hodnotu zemního odporu uzlu soustavy R_A (uzel transformátoru), jehož velikost nesmí překročit 5Ω a celkový odpor uzemnění všech vodičů PEN (PE), které odcházejí z transformovny, včetně uzlu zdroje, hodnotu 2Ω při napětí vůči zemi $U = 230 \text{ V}$. Pokud to nepříznivé půdní podmínky v místě instalace uzemnění nedovolují, lze tyto hodnoty překročit maximálně do výše 15Ω . Pod ztíženými půdními podmínkami si lze představit místo, u kterého hodnota rezistivity půdy v hloubce 1-3 m dosahuje vyšší hodnoty než $200 \Omega\text{m}$. Z tohoto důvodu je před samotnou realizací zemnicí soustavy nezbytné provést měření rezistivity půdy v místě, kde bude zhotovena. Problematikou měření rezistivity půdy je především její nestálost v závislosti na druhu půdy, její vlhkosti a klimatických změnách způsobených deštěm či sněžením. Tyto změny je třeba při návrhu a měření uzemnění zohlednit.

Mezi další důležitá měření patří měření dotykových napětí. Jestliže může dojít k dotyku u nějaké části vzdálené alespoň 2 m okolo testovaného objektu, měří se dotykové napětí mezi dvěma elektrodami (ruka-ruka). Jestliže v této vzdálenosti 2 m k dotyku dojít nemůže, měří se dotykové napětí mezi rukou a nohou, které jsou ve vzdálenosti 1 m od testovaného objektu. Norma ČSN EN 50 522 udává hodnotu napětí, které se připouští na lidském těle po dobu trvání poruchy, a které zaručuje bezpečnost osoby, jako velikost maximálního dovoleného ustáleného dotykového napětí $U_{Tp} = 75 \text{ V}$ pro dobu trvání poruchy $t_F \geq 5 \text{ s}$.

Při měření zemnicích soustav musíme brát také ohled na problematiku přenosu nebezpečného potenciálu ze sítí o jmenovitém napětí nad 1 kV do sítí nízkého napětí, které může v horších případech přímo ohrozit koncového uživatele.

Na všechnny typy měření však i při výběru nejideálnějších podmínek vždy působí několik parazitních vlivů, které nelze zcela eliminovat. Tyto vlivy lze však minimalizovat.

Mezi faktory, které negativně ovlivňují a zkreslují výsledné naměřené hodnoty, patří zejména výskyt bludných proudů v zemi, připojení nadzemních vedení, zakopaná vodní potrubí, pláště kabelových vedení či další kovové části vyskytující se v okolí testované zemnicí soustavy.

Podkladem pro zhodnocení všech těchto parametrů a výsledná evaluace byla provedena s ohledem na související platné normy ČSN a PNE.

2 TEORIE UZEMNĚNÍ V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH VN/NN

Uzemnění elektrických zařízení je dle normy ČSN 33 3201 provedení takových nutných spojení, aby určené místo přístroje, zařízení nebo sítě bylo udržováno pokud možno na potenciálu země.

Volba systému uzemnění nám definuje možnosti provozu soustavy z hlediska bezpečnosti, chránění, dimenzování či nepřetržitosti dodávky elektrické energie. V případě bezporuchového stavu symetrické sítě se způsob uzemnění nijak prakticky neprojeví na jejím provozu. Zásadní rozdíl je v případě poruchy, kdy dojde k vodivému spojení jedné fáze se zemí. Pokud tato porucha vznikne uvnitř sítě účinně uzemněné či uzemněné přes uzlový odporník, jedná se o jednofázový zkrat a poruchový proud dosahuje úrovní, které vylučují další provoz postižené soustavy. V tomto případě musí dojít v co nejkratším čase k odpojení postiženého vedení a tedy i k přerušení dodávky elektrické energie. U sítí neúčinně uzemněných či izolovaných se jedná o zemní spojení, jehož poruchový proud nedosahuje tak vysoké hodnoty a není tedy bezpodmínečně nutné okamžité vypnutí postiženého vývodu. Právě velikost poruchového proudu je značně ovlivněna použitým systémem uzemnění, a je tedy směrodatná pro určení rizika úrazu elektrickým proudem, dimenzování či pro zhodnocení mechanických následků způsobených poruchou [1].

2.1 Požadavky na uzemnění

Při návrhu uzemňovacích soustav se musíme řídit obecně stanovenými požadavky, které mají zajistit ochranu lidí a zvířat před úrazem při dotyku neživých částí, ochranu elektrických strojů a zařízení před účinky velkých proudů a přepětí, a zároveň správnou funkčnost připojených elektrických zařízení. Mezi tyto požadavky patří:

- a) normou stanovený zemní odpor
- b) maximální přípustné napětí na zemnicí soustavě
- c) dovolené dotykové a krokové napětí
- d) proudová zatížitelnost

Hlavním záměrem je dle [2]:

- docílit, aby uzemněním uzlu trojfázové sítě, strojů a transformátorů, nebo středního vodiče rozvodu měly fáze nebo vodiče stálé napětí proti zemi
- docílit, aby se uzemněním vedení, na němž se pracuje, předešlo úrazu při náhodném zapnutí nebo indukovaným napětím od jiného vedení
- docílit uzemněním správnou činnost průrazek a bleskojistek
- odvádět uzemněním náboje statické elektřiny a bránit korozi uzemněním jednoho pólu katodické ochrany

Výchozími parametry pro dimenzování uzemnění, které udává norma PNE 33 0000-4, jsou velikost poruchového proudu, doba trvání poruchy a vlastnosti půdy.

3 REZISTIVITA PŮDY

Základním požadavkem při návrhu, výpočtu či měření zemního odporu je rezistivita (měrný odpor) půdy. Elektrická rezistivita půdy ρ_E je dle [3] specifický odpor typického vzorku země a vyjadřuje míru schopnosti přenášet elektrický náboj. Tato veličina se vyjadřuje v jednotkách Ωm , což je údaj popisující odpor válce o průřezu 1 m^2 a délce 1 m zcela naplněného zeminou.

Rezistivitu je třeba měřit v hloubce, v níž se ukládají zemniče. Rezistivita půdy v okolí instalované uzemňovací soustavy musí být maximálně $200\ \Omega\text{m}$. Jestliže dosahuje vyšší hodnoty, musíme přistoupit k návrhu takových opatření, aby byla dodržena povolená hodnota odporu uzemňovací soustavy.

Pro stanovení zemního odporu rozsáhlých zemničů, jako jsou uzemňovací sítě venkovních rozvodů, však není tato hodnota zcela směrodatná, liší-li se vodivosti spodních vrstev od horních. Z takového zemniče odtéká proud široce do země jako z mohutného tělesa a na odpor má proto vliv vodivosti i hluboko položených vrstev. Zde je třeba určit střední rezistivitu půdy do hloubky srovnatelné s celkovými rozměry zemniče a tedy zpravidla do hloubky několika desítek metrů [4]. V Tab. 3-1 Střední hodnoty rezistivity půd [3] uvádí ČSN EN 50 522 typické střední hodnoty rezistivity podle typu půdy.

Tab. 3-1 Střední hodnoty rezistivity půd [3]

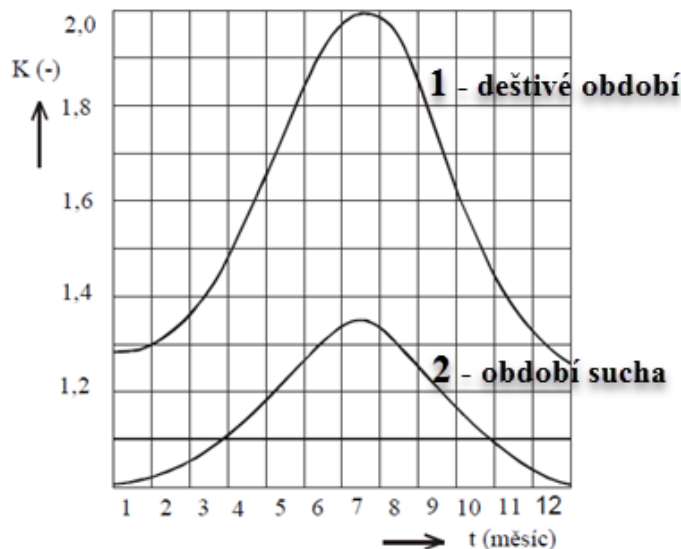
Typ půdy	Střední hodnoty rezistivity půdy ρ_E (Ωm)
Močál	5 až 40
Hlína, jíl, humus	20 až 200
Písek	200 až 2500
Štěrkopísek	2000 až 3000
Zvětralá skála	většinou do 1000
Pískovec	2000 až 3000
Žula	až do 50000

Vodivost půdy závisí nejen na jejím druhu, ale i na teplotě, vlhkosti, stavu spodní vody a povětrnosti. Rezistivita půdy proto značně kolísá i podle ročního období. Zmrzlá země má špatnou vodivost, obdobně jako suchá půda. Špatným vodičem je i sladká voda a mastnota. Vliv vodivosti může mít i trvalý průchod proudu, který půdu vysušuje [4].

Parametry zeminy se mohou lišit od místa k místu, ale také v rámci jednotlivých půdních vrstev a jejich hloubce pod povrchem země. V závislosti na ročním období dochází k většímu kolísání rezistivity. Tyto změny jsou nejvíce patrné v půdních vrstvách nacházejících se těsně pod povrchem. Vliv kolísání rezistivity v závislosti na ročním období se eliminuje tak, že se naměřené hodnoty rezistivity vynásobí koeficientem K dle Obr. 3-1. Odečítání z těchto křivek lze uplatnit pouze při měření v hloubce do 3 m .

Významný vliv na výsledný měrný odpor půdy může mít také nadmořská výška, jelikož ve vyšších polohách (nad 400 m n. m.) jsou obecně teploty nižší a častěji se zde vyskytují atmosférické srážky, které způsobují odplavování kvalitní zeminy obsahující humus z vrchních

vrstev půdy. Tento efekt je jedním z faktorů, které nepříznivě ovlivňují výslednou vodivost půdy. V nižších nadmořských výškách je situace opačná. Půda má zde s ohledem na vodivost mnohem lepší parametry. Díky tomu při poruchách v síti dochází k efektivnějšímu rozptylu proudu do okolí zemniče [6]. Na Obr. 3-1 lze vidět závislost měření rezistivity půdy v deštivém období (závislost 1) a měření v období sucha (závislost 2).



Obr. 3-1 Závislost činitele K na ročním období (deštivé období – závislost 1, suché období – závislost 2) [5]

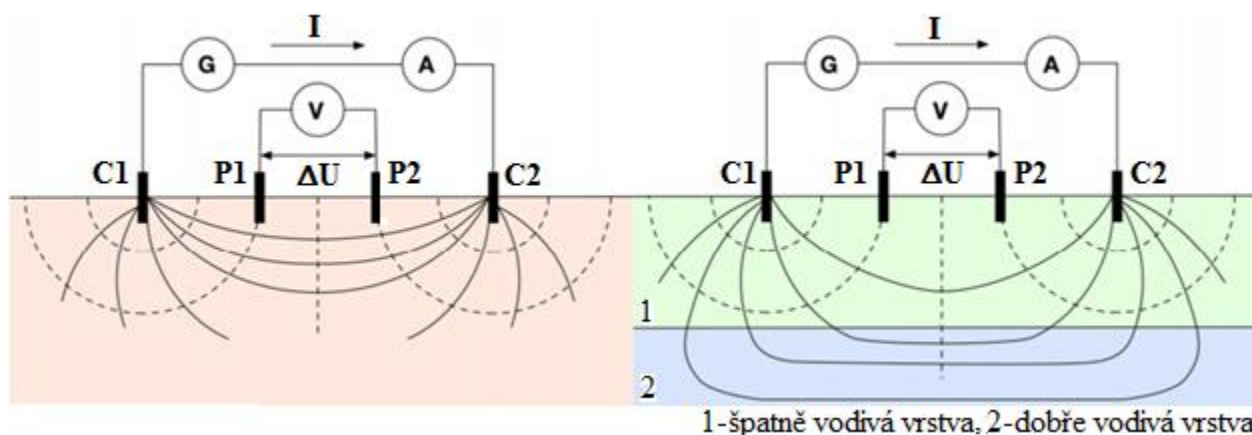
3.1 Metody měření rezistivity půdy

Stanovení hodnoty rezistivity půdy lze provádět měřením. Měření rezistivity půdy pomocí čtyř elektrod se označuje jako geoelektrické měření. V praxi se nejčastěji užívá metoda Schlumbergerova a Wennerova. Obě jsou velmi podobné a liší se pouze vzájemným uspořádáním měřících elektrod. Metoda Wennerova je více používaná a upřednostňuje ji také norma ČSN 33 2000-5-54.

Základní princip geoelektrických měření spočívá v připojení stejnosměrného nebo střídavého zdroje napětí na proudové (vnější) elektrody C1 a C2, jimiž protéká proud a následně vzniká v zemi proudové pole. Předpokládáme-li, že měřená půda má homogenní a izotropní vlastnosti, tzn., že proudová hustota je uvnitř pole ve všech místech stejná, silové čáry propojují elektrody T1 a T4, přičemž ekvipotenciální křivky mají kružnicový tvar a jsou na siločáry kolmé. Mezi ekvipotencionálními plochami napěťových (vnitřních) elektrod P1 a P2 pak měříme rozdíl potenciálu ΔU . Rozmístění elektrod je znázorněno na Obr. 3-2 Obr. 3-2 Rozložení elektrického pole v homogenní půdě (vlevo) a nehomogenní půdě (vpravo) [6]. Podle Ohmova zákona (3.1) si poté lze jednoduše vyjádřit výsledný odpor půdy mezi ekvipotenciálními plochami.

$$R = \frac{\Delta U}{I} \quad (3.1)$$

kde ΔU napětí naměřené mezi napěťovými elektrodami P1 a P2 (V)
 I proud protékající proudovými elektrodami C1 a C2 (A)



Obr. 3-2 Rozložení elektrického pole v homogenní půdě (vlevo) a nehomogenní půdě (vpravo) [6]

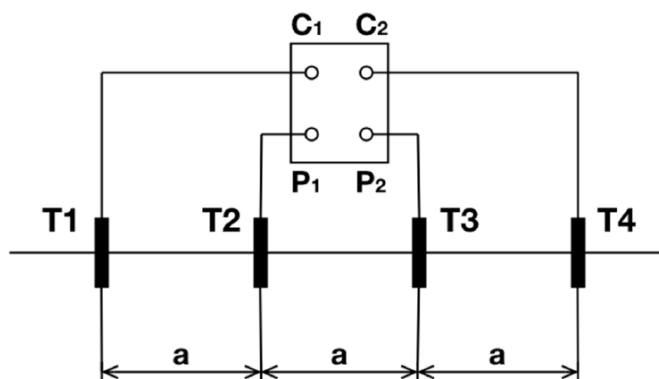
V přírodě se vyskytuje spíše půda nehomogenní, kde mají jednotlivé půdní vrstvy rozličné parametry a tedy i různou rezistivitu. Vlivem kolísání rezistivitu v těchto vrstvách dochází k deformaci silových čar. Vpravo na Obr. 3-2 lze vidět 2 typy půdy o rozdílné rezistivitě. Vrchní vrstva půdy je složena ze zeminy o vyšší rezistivitě než vrstva spodní. To má za následek ovlivnění ekvipotenciálního pole a zároveň výslednou velikost napětí U_S na napěťových elektrodách P1 a P2.

Měření rezistivity půdy slouží k [7]:

- stanovení zemního odporu testované zemnicí soustavy
- stanovení potenciálového spádu zahrnující dotykové a krokové napětí
- výpočtu induktivních vazeb mezi silovými a komunikačními obvody
- návrhu katodové ochrany
- geologickým průzkumům

3.1.1 Wennerova metoda

Jedná se o nejčastěji využívanou metodu v praxi, která využívá čtyř měřicích elektrod. Princip uspořádání elektrod a zapojení přístroje pro měření rezistivity touto metodou je uveden na Obr. 3-3. Jako elektrody se použijí tyče o průměru 15 až 20 mm, zaražené v jedné přímce do hloubky 20 cm v rozestupu a . Proudové elektrody (vnější) se připojí na svorky C1 a C2 a potenciálové (vnitřní) na svorky P1 a P2. Proudovými elektrodami je do obvodu přiváděn testovací proud, vnitřními elektrodami se měří úbytek napětí vyvolaný testovacím proudem na vzdálenost a . Rozstup elektrod a se postupně zvětšuje podle požadované hloubky měření a měření se provede na několika místech [1].



Obr. 3-3 Schéma zapojení Wennerovy metody měření rezistivity půdy [8]

Rezistivita půdy ρ se vypočítá ze vztahu:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (3.2)$$

kde	ρ	rezistivita půdy (Ωm)
	a	vzdálenost mezi elektrodami (m)
	R	naměřený odpor (Ω)

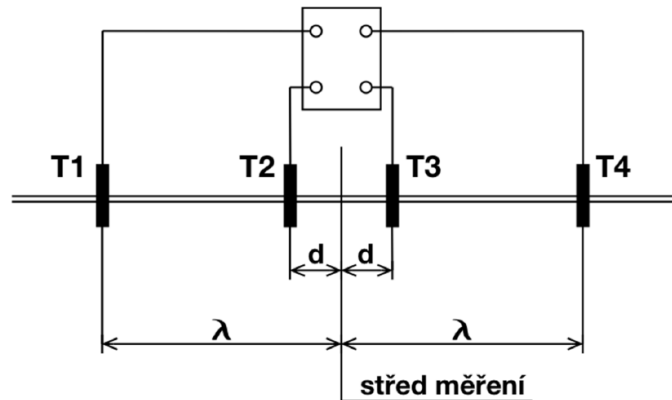
Tento vztah platí za předpokladu, že hloubka elektrod h je mnohem větší než rozestup elektrod a . Je-li nutné elektrody zarazit do větší hloubky, aby byl dosažen požadovaný zemní odpor elektrod (zpravidla v půdách s velkou rezistivitou) je třeba podle Tab. 3-2 vynásobit výslednou hodnotu konfigurační konstantou. Takto stanovenou rezistivitu považujeme za střední rezistivitu půdy do hloubky rovné rozestupu elektrod a [1].

Tab. 3-2 Konfigurační konstanta k [1]

a/h	0,25	0,5	1	2	4	6	8	10	20	>20
k	2	1,9	1,7	1,3	1,1	1,05	1,03	1,02	1,01	1

3.1.2 Schlumbergerova metoda

Tato metoda je méně náročná a stejně přesná jako Wennerova metoda. Pro měření rezistivity půdy využívá také uspořádání čtyř elektrod, avšak v tomto případě pro ně platí rozdílná pravidla.



Obr. 3-4 Schéma zapojení Schlumbergerovy metody měření rezistivity půdy [8]

Rezistivita půdy ρ_E se vypočítá ze vztahu:

$$\rho_E = R \cdot k \quad (3.3)$$

$$k = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\lambda^2}{d} - d \right)$$

kde	ρ_E	rezistivita půdy (Ωm)
	k	přepočítávací koeficient (-)
	R	naměřený zemní odpor (Ω)

Takto stanovená rezistivita je střední hodnotou do hloubky rovné přibližně rozestupu elektrod od středu měření [8]. Dle normy PNE 33 0000-1 lze využít pro usnadnění výpočtu hodnoty koeficientů pro měření do hloubky 3 m.

Tab. 3-3 Hodnoty koeficientů pro měření rezistivity půdy [8]

λ (m)	d (m)	k (-)
1	0,25	5,9
2	0,5	11,8
3	0,5	27,5

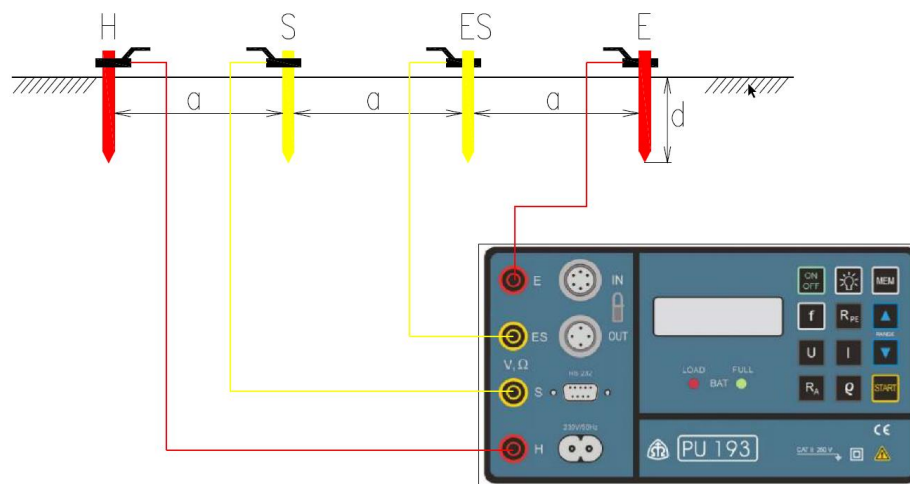
Rozdíl mezi Wennerovou a Schlumbergerovou metodou spočívá v tom, že u Wennerovy metody lze pomocí regulace vzdálenosti a mezi elektrodami zaraženými v zemi měřit větší prostor v podloží půdy, proto se jí dává v praxi přednost a tato metoda bude využita pro měření v praxi v praktické části této práce.

3.1.3 Měření rezistivity půdy v praxi

Pro účely této práce byly k měření rezistivity půdy využity celkem dva přístroje, a to z důvodu ověření přesnosti měření, zjištění případných odchylek a získání co nejpřesnějších výsledků. Jednalo se o zařízení pro měření zemních odporů PU 193 od firmy METRA BLANSKO, a.s. a měřicí jednotku CPC 100 od firmy OMICRON. Obě zařízení využívají výše uvedenou Wennerovu metodu.

3.1.3.1 Využití měřicího zařízení PU 193

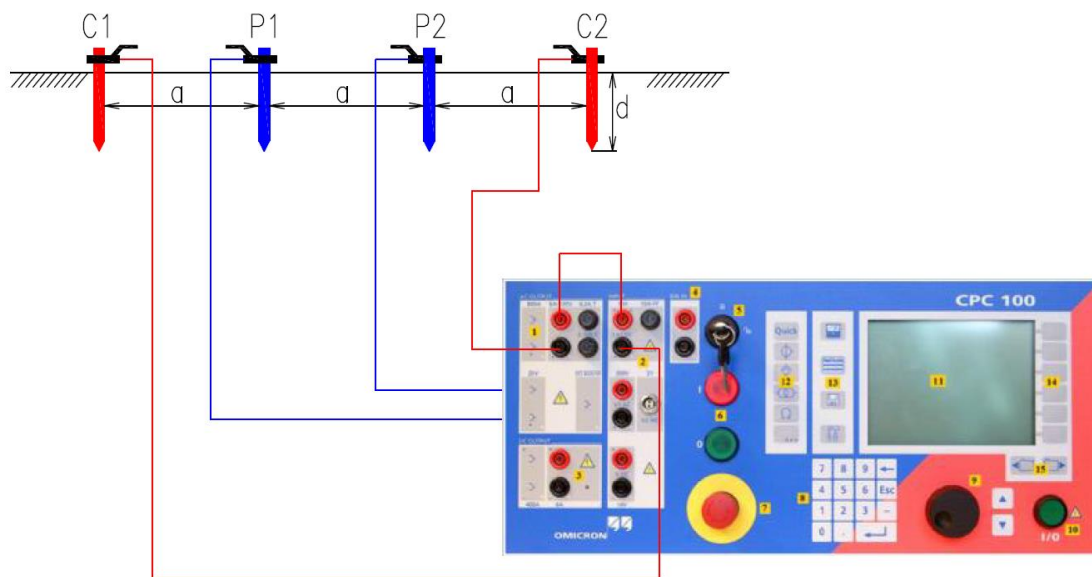
Zařízení PU 193 může měřit hodnotu rezistivity půdy až do $20 \text{ k}\Omega\text{m}$ a umožňuje obsluhu volbu vzdálenosti mezi elektrodami a volbu kmitočtu. Na rozdíl od CPC 100 ukazuje přímo pro nastavenou vzdálenost mezi elektrodami hodnotu rezistivity půdy v jednotkách Ωm , která je dopočítána podle vztahu (3.2). Tento měřicí přístroj je včetně zapojení pro měření rezistivity půdy zobrazen na Obr. 3-5.



Obr. 3-5 Zapojení měřicího přístroje PU193 pro měření rezistivity půdy

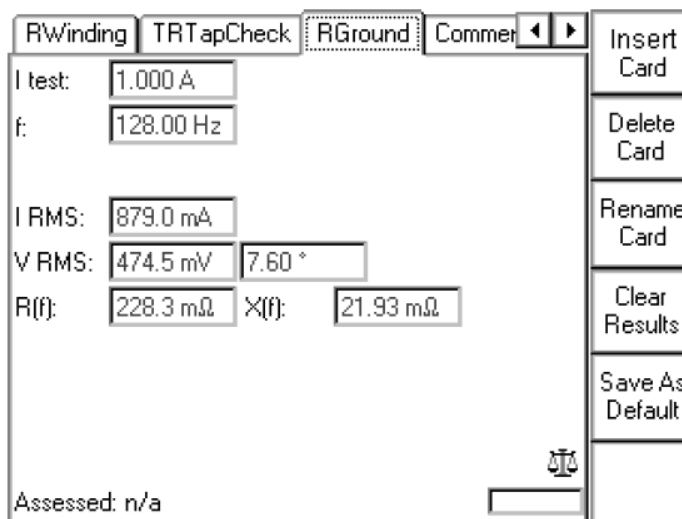
3.1.3.2 Využití měřicího systému CPC 100

Měřicí přístroj CPC 100 byl v praktické části práce využit také k měření rezistivity půdy v okolí zemnicí soustavy betonového sloupu s úsekovým odpínačem. Pro měření využívá také Wennerovu metodu. Princip této metody a schéma zapojení je znázorněno na Obr. 3-6.



Obr. 3-6 Schéma zapojení CPC 100 pro měření rezistivity půdy [9]

Při měření se nejprve umístí elektrody do jedné přímky, přičemž vzdálenost mezi jednotlivými elektrodami zůstane stejná. Poté pomocí CPC probíhá injektáž proudu do půdy pomocí dvou proudových elektrod (C1, C2) a měření úbytku napětí mezi napěťovými elektrodami (P1, P2).



Obr. 3-7 Nastavení měřicího přístroje CPC 100 pro měření rezistivity půdy [9]

Při zapnutí přístroje nejprve obsluha stiskem pole „Insert Card“ zobrazí výběr všech měření, kterými přístroj disponuje. Nyní zvolí složku „Resistance“ a v ní typ měření „Rground“, tímto se zobrazí stejná nabídka jako na Obr. 3-7. Zde může obsluha nastavit testovací proud a frekvenci. Při volbě frekvence by se obsluha měla vyvarovat z důvodů rušení síťové frekvenci 50 Hz. Stiskem zeleného tlačítka je zahájeno měření. Přístroj změří hodnotu zemního odporu $R(f)$, který lze poté dosadit do vztahu (3.2) a následně tak určit rezistivitu půdy ρ_E .

4 ZEMNÍ ODPOR

Zemní odpor R_E zemniče umístěného v zemi je činný odpor mezi přípojovací svorkou zemniče a určitým místem země v okolí zemniče, kde se již vliv zemniče neuplatňuje. Je to součet odporu svorky, odporu svodu odporu zemniče, přechodového odporu mezi zemničem a půdou a odporu půdy obklopující zemnič až do vzdálenosti, kde se již vliv zemniče neuplatní [10]. Jak už bylo v předešlé kapitole zmíněno, na hodnotu zemního odporu má největší vliv rezistivita půdy, která je velmi závislá na její vodivosti (tedy na její kvalitě a druhu) a rozměry a uspořádání zemniče. Dle normy PNE 33 0000-1 jsou kladeny specifické požadavky na hodnotu zemního odporu uzlu soustavy R_A (uzel transformátoru), jehož velikost nesmí překročit 5Ω a celkový odpor uzemnění všech vodičů PEN (PE), které odcházejí z transformovny, včetně uzlu zdroje, hodnotu 2Ω při napětí vůči zemi $U = 230 \text{ V}$. Pokud to nepříznivé půdní podmínky v místě instalace uzemnění nedovolují, lze tyto hodnoty překročit maximálně do výše 15Ω . Pod ztíženými půdními podmínkami si lze představit místo, u kterého hodnota rezistivity půdy v hloubce 1-3 m dosahuje vyšší hodnoty než $200 \Omega\text{m}$ [8].

4.1 Metody měření zemního odporu

Při měření zemního odporu v praxi je ověřována hodnota mezi zemničem a okolní půdou, která by se měla shodovat s hodnotou odporu vypočtenou, a zároveň hodnotou uvedenou v normě. Výsledek měření může být značně ovlivněn v bezprostřední době po realizaci, kdy ještě zemnič, např. zemnicí pásek, není dostatečně propojen s okolní zeminou, která je navíc nedostatečně usazená a zvyšuje se tím její celková rezistivita [6].

Měření zemního odporu nebo impedance a rozložení potenciálu na povrchu země je při průchodu poruchového proudu zemí nezbytné pro [7]:

- a) ověření rozsahu nové zemnicí soustavy
- b) vyhledání změn u existující zemnicí soustavy
- c) určení nebezpečného dotykového a krokového napětí
- d) určení nárůstu potenciálu země za účelem nastavení ochran silových a komunikačních obvodů

Použitý způsob měření závisí především na rozloze měřeného zemniče a také na míře rušivých vlivů, které lze v okolí zemniče očekávat. Normy ČSN EN 50 522 a ČSN 33 3201 definují pro měření zemního odporu a zemní impedance tyto metody [3, 13]:

- a) metoda spádu potenciálu s měřičem uzemnění pro malé a střední zemniče
- b) proudová metoda pro měření impedance velkých uzemňovacích soustav
- c) vysokofrekvenční měřič uzemnění pro malé a střední zemniče bez možnosti odpojení měřeného zemniče

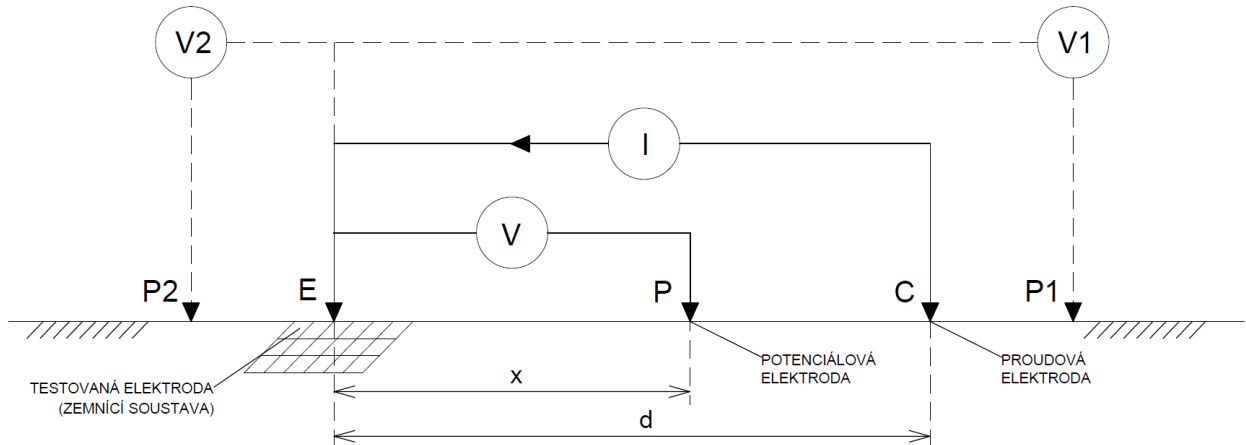
4.1.1 Metoda potenciálového spádu

Metoda potenciálového spádu je vhodná pro měření zemních odporů zemničů s menší rozlohou, se zemním odporem větším než $0,5 \Omega$. Jedná se o jednotlivé tyčové nebo paprskové zemniče, uzemnění stožárů, nebo uzemnění malých distribučních trafostanic [1].

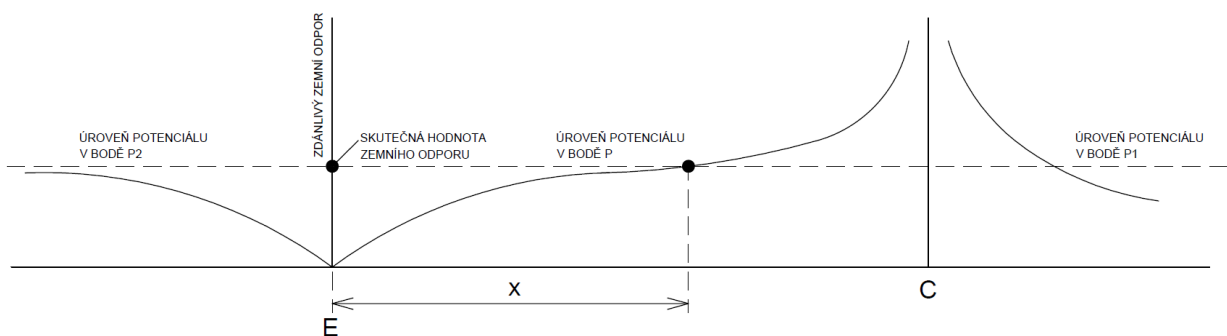
Princip metody spočívá v injektování testovacího proudu o určitém kmitočtu, rozdílném od síťového kmitočtu 50 Hz , přes proudovou elektrodu a následné vyhodnocení nárůstu potenciálu mezi testovanou zemnicí soustavou a potenciálovou elektrodou. Proudová elektroda

umožňuje průchod testovacího proudu do měřené zemnicí soustavy (viz *Obr. 4-1*). Tento proud procházející skrz testovanou zemnicí soustavu (elektrodu E) a referenční „vzdálenou“ zem (proudovou elektrodu C), způsobuje nárůst potenciálu země, který je měřen za pomoci potenciálové elektrody P. Následný pokles potenciálu v závislosti na vzdálenosti je znázorněn na *Obr. 4-2*. Metoda poklesu potenciálu vychází z Ohmova zákona a poměru $U/I = R$, kde odpor R závisí na vzdálenosti x . Tato vzdálenost určuje posun potenciálové elektrody ve směru od testované elektrody E a udává nám skutečnou hodnotu zemního odporu. V každém kroku se zaznamenává naměřená hodnota zemního odporu, která je vyjádřena v závislosti na vzdálenosti.

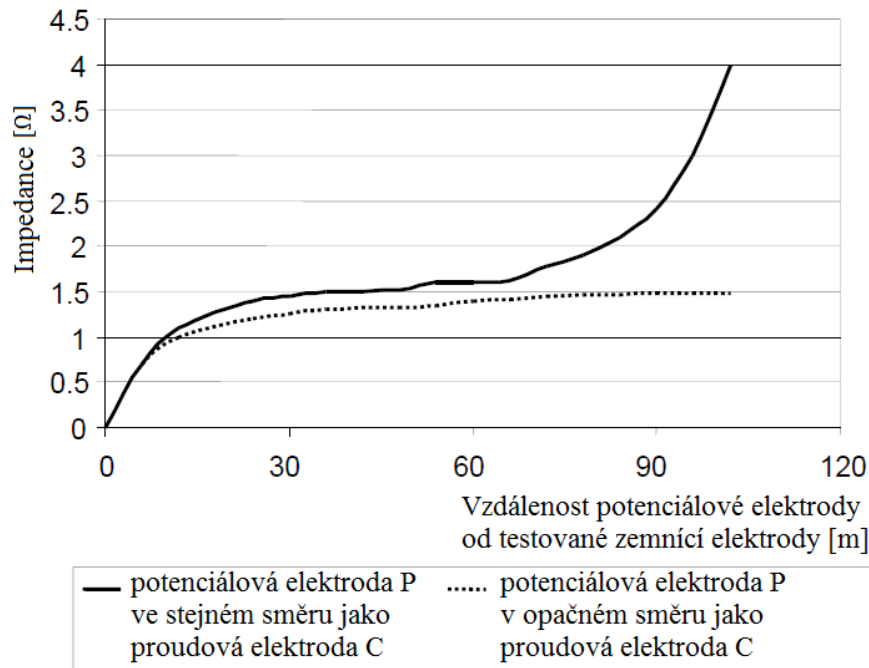
Umístění potenciálové elektrody P je pro správné určení zemního odporu klíčové. Tato lokace musí být mimo dosah vlivu testované elektrody E a proudové elektrody C. Toho je dosaženo provedením dvou až třech měření při různých vzdálenostech mezi těmito elektrodami [11]. Jestliže je potenciálová elektroda P umístěna v opačném směru od testované elektrody E (P2), naměřená hodnota zemního odporu bude menší než skutečná (viz *Obr. 4-3*). Je-li však potenciálová elektroda P umístěna ve větší vzdálenosti, ale ve stejném směru jako proudová elektroda C (P1), je naměřena skutečná hodnota zemního odporu jako při umístění potenciálové elektrody P ve vzdálenosti x od testované zemnicí soustavy E (viz *Obr. 4-2*).



Obr. 4-1 Metoda potenciálového spádu [7]



Obr. 4-2 Závislost zdánlivého zemního odporu na vzdálenosti x [7]



Obr. 4-3 Závislost zemní impedance na vzdálenosti potenciálové elektrody od testované zemní soustavy [11]

Při měření v praxi je třeba brát ohled na několik různých činitelů, které mají na přesnost naměřených hodnot zemního odporu podstatný vliv. Mezi tyto činitele patří:

a) vzdálenost měřicích elektrod od zemniče

Za účelem získání co nejpřesnějších hodnot, musí být proudová elektroda C umístěna mimo dosah účinku testované zemní soustavy E, kde má testovací zemní proud zanedbatelný vliv na měření nárůstu potenciálu – referenční (vzdálená) zem. Norma PNE 33 0000-4 ji definuje jako část Země považována za vodivou, která je mimo dosah vlivu zemniče nebo uzemňovací soustavy, jejíž elektrický potenciál je podle úmluvy považován za rovný nule [12].

Vzdálenosti měřicích elektrod od zemniče udává podniková norma PNE 33 0000-1. Vzdálenější proudová elektroda C by měla být umístěna minimálně ve vzdálenosti 40 m kolmo na delší rozměr zemniče.

b) prostorové uspořádání elektrod

Výsledek měření může výrazně ovlivnit také vzájemná poloha měřicích elektrod vůči zemniči. Proudová elektroda C by měla být v jedné přímce s blíže umístěnou napěťovou sondou P a testovanou elektrodou E (středem měřené zemní soustavy). Uspořádání elektrod vůči měřenému zemniči E je znázorněno na Obr. 4-2. V souvislosti s tímto rozmístěním pak platí vztah (4.1):

$$x = 0,62 \cdot d \text{ (m)} \quad (4.1)$$

Jestliže nám norma udává vzdálenost proudové elektrody C $d = 40$ m, jednoduchým dosazením do rovnice (4.1) vypočteme vzdálenost $x = 25$ m od potenciálové elektrody P (pokud výrobce měřicích přístrojů neudává jinak).

c) vlivy jiných zemničů

Je důležité, aby proudová elektroda C a testovaná zemní soustava E byly umístěny v dostatečné vzdálenosti od vlivu potenciálního pole cizích zemničů či jiných kovových zařízení, umístěných pod zemí v blízkosti místa měření. Pokud vznikne podezření, že by získaný výsledek mohl být ovlivněn, je vhodné provést měření v několika směrech, přičemž uvažujeme nejvyšší naměřenou hodnotu [8]. Jak už bylo zmíněno dříve, pomocí metody potenciálového spádu je měřen zemní

odpor mezi testovanou zemnicí soustavou a referenční (vzdálenou) zemí. Jestliže naměřené hodnoty dosahují daleko vyšších hodnot, než hodnoty předpokládané před začátkem měření, mohlo dojít k vodivému spojení k vodiči, který není dostatečně připojen k zemnicí soustavě. Tento problém lze minimalizovat opakováním měření v jiných místech zemnicí soustavy. Jestliže jsou naměřené hodnoty velmi odlišné, zemnicí soustava může být v některém místě poškozena.

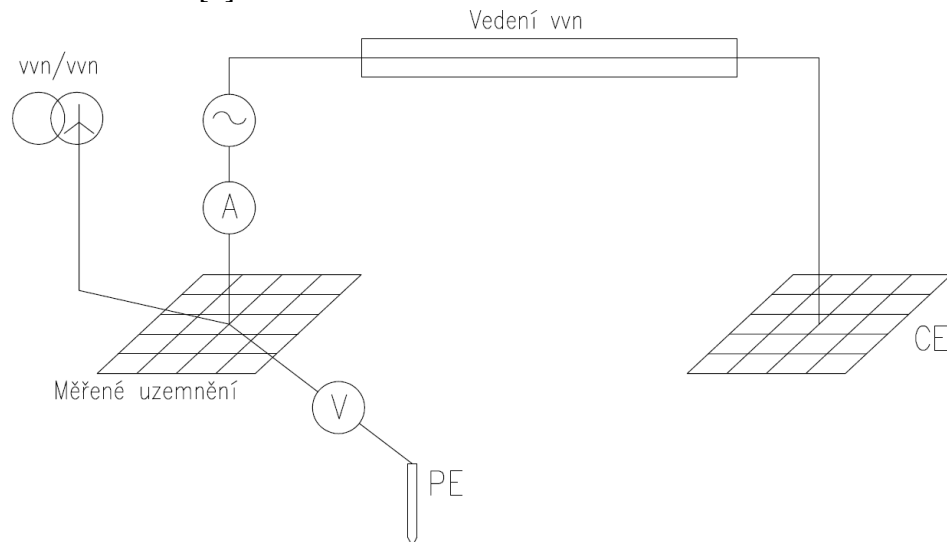
Před samotným měřením je potřeba měřený zemnicí odpojit v místě revizní svorky. Pokud není při měření využito přístroje ukazujícího přímo výsledný odpor zemniče R_A , určí se tento odpor z napětí mezi elektrodami E a P a proudu procházející elektrodami E a C (za předpokladu, že se vzájemně neovlivňují). Pro určení využijeme Ohmův zákon:

$$R = \frac{U_m}{I_m} \quad (4.2)$$

Hlavní výhodou této metody spočívá ve využití testovacích elektrod, které mohou mít podstatně vyšší odpor než je naměřená hodnota zemního odporu testované zemnicí soustavy, aniž by došlo k významnému ovlivnění měření.

4.1.2 Proudová metoda

Tato metoda je určena k měření zemního odporu velkých uzemňovacích soustav. Její podstata spočívá v měření úbytku napětí na uzemnění, který vyvolá vnučený zkušební proud. Zdroj proudu se zapojí mezi měřené uzemnění a vzdálenou proudovou elektrodu CE. Jako proudová elektroda CE se využije uzemnění sousední elektrické stanice nebo se vedení uzemní na stožáru ve vzdálenosti nejméně 5 km od měřené elektrické stanice. Je-li tato vzdálenost menší, musí se zemnicí lano od měřené zemnicí soustavy odpojit [8]. Napětí se měří voltmetrem s velkým vnitřním odporem, zapojeným mezi měřené uzemnění a elektrodou PE. Zemní odpor se stanoví z podílu napětí a proudu. Napájecí zdroj se připojí k měřenému uzemnění v blízkosti uzemnění uzlů transformátorů [1].



Obr. 4-4 Měření zemního odporu uzemnění proudovou metodou [1]

Kdyby byl plášť oboustranně nebo v průběhu trasy uzemněn, bude hodnota napětí v důsledku redukčního účinku kabelového pláště značně zkeslena (naměří se menší hodnota).

Vliv redukčního činitele se projeví také u vedení se zemnicím lanem, které bylo použito pro spojení s proudovou elektrodou, a proto se musí při výpočtu zemního odporu vzít v úvahu.

Zemní odpor odpovídá dle Ohmova zákona podílu napětí a proudu.

$$R_E = \frac{U_m}{r \cdot I_m} \quad (4.3)$$

kde	R_E	zemní odpor (Ω)
	U_m	naměřená hodnota napětí (V)
	I_m	měřicí proud (A)
	r	redukční činitel vedení použitého k elektrodě CE (-)

4.1.3 Vysokofrekvenční měřič uzemnění

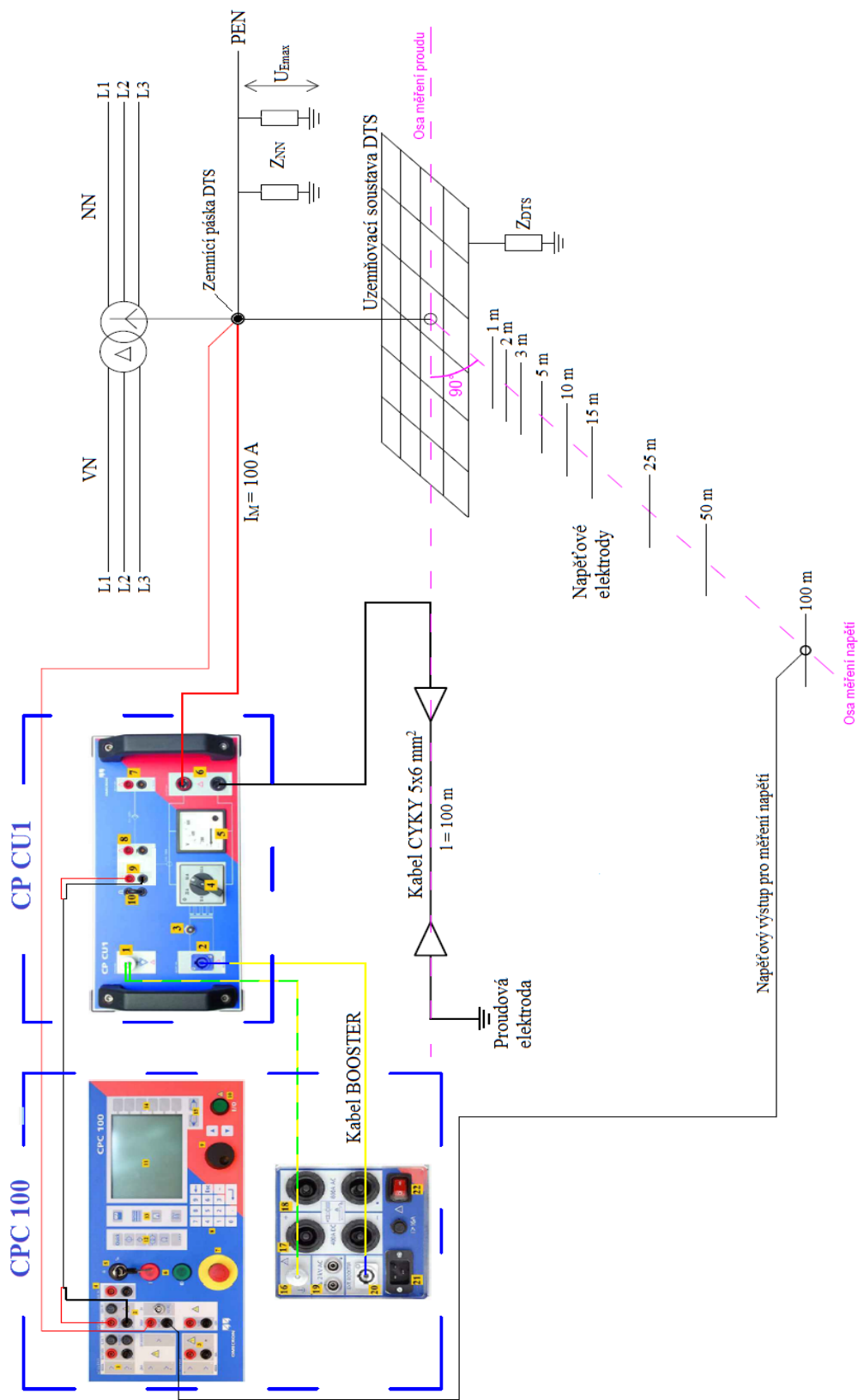
Přístroj urychluje měření uzemnění jednotlivého stožáru bez odpojení zemnicího lana. Kmitočet měřících proudu má být tak vysoký, aby impedance zemnicího lana a sousedních stožárů vzrostla a představovala prakticky zanedbatelný paralelní obvod k uzemnění stožáru [3].

4.2 Využití metody v praxi

V praxi pro měření byla využita metoda potenciálového spádu, která je vhodná pro měření zemních odporů zemniců s menší rozlohou, se zemním odporem větším než $0,5 \Omega$. V našem případě se jednalo o zemnicí soustavu distribučních trafostanic a stožárů s úsekovými odpínači. Před samotným měřením je potřeba měřený zemnič odpojit v místě revizní svorky. Princip této metody je zpracován v kapitole 4.1.1.

4.2.1 Využití metody potenciálového spádu

K měření zemnicí soustavy DTS nebo sloupů VN bylo využito měřicího systému CPC 100 a jeho vazební jednotky CP CU1 od společnosti OMICRON. Injektáž proudu byla provedena pomocí měřicího systému a silového kabelu CYKY 5x6 mm² délky 100 m. V této vzdálenosti byla kolmo do země umístěna proudová elektroda o délce 1,5 m, která sloužila pro injektáž proudu. Napěťové sondy (elektrody) byly poté umísťovány v konkrétních vzdálenostech, s ohledem na průchod proudu pod úhlem 90° (z ptáčích perspektivy), jak je znázorněno na *Obr. 4-5*. Podrobný popis a návod je uveden v mé bakalářské práci [4].

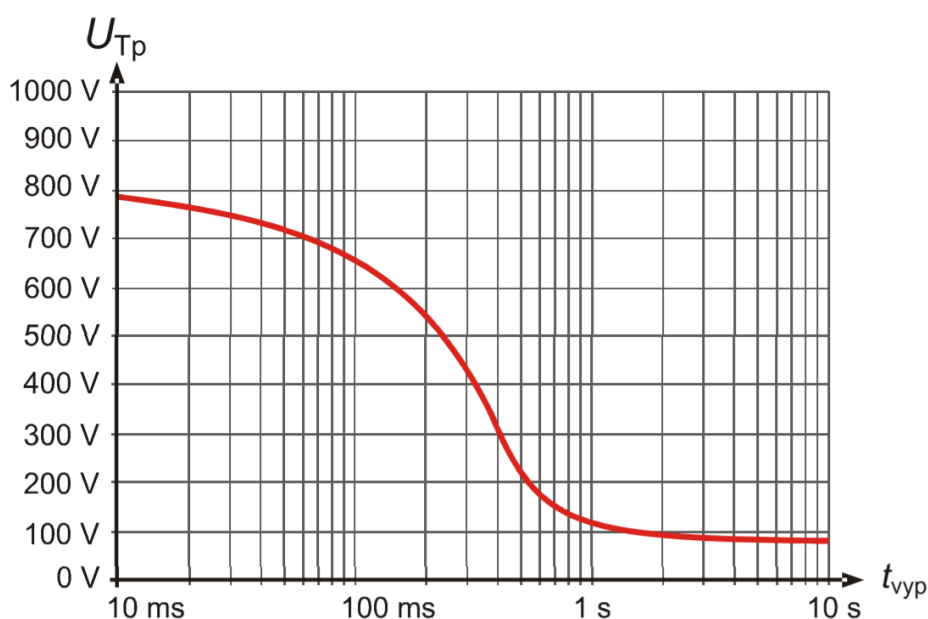


Obr. 4-5 Schéma měření zemnění soustavy DTS pomocí metody potenciálového spádu [4]

5 DOTYKOVÁ A KROKOVÁ NAPĚTÍ

Dotykové napětí U_T je definováno dle [3] jako napětí mezi vodivými částmi, kterých se člověk nebo zvíře dotýká současně. Krokové napětí U_K je definováno dle [3] jako napětí mezi dvěma body zemského povrchu vzdálenými od sebe 1 m. Vzdálenost 1 m je považována za délku kroku člověka.

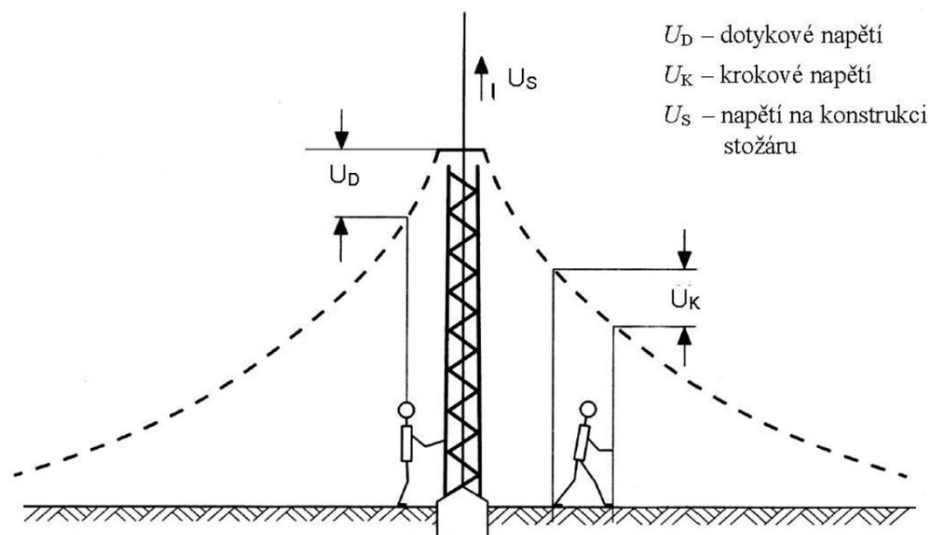
Příčinou ohrožení je proud procházející lidským tělem. Pro praxi je výhodnější vycházet z dotykových napětí. Meze dotykových napětí proti zemi jsou dány normou [13] a znázorněny na Obr. 5-1. Křivka představuje napětí, která se mohou objevit na lidském těle při dotyku holou rukou proti bosé noze. Tato závislost se týká zemních poruch v sítích nad 1 kV. Jelikož je každá zemní porucha odpojována automaticky nebo ručně, nevznikají tak jako následek zemních poruch neomezeně dlouho trávající dotyková napětí [13].



Obr. 5-1 Dovolena dotyková napětí U_{Tp} pro omezené trvání průtoku proudu [13]

Dovolené dotykové napětí pro omezené trvání průtoku proudu U_{Tp} – je dle [3] napětí, které se připouští na lidském těle po dobu trvání poruchy t_F a které zaručuje bezpečnost osoby. Norma udává jako velikost maximálního dovoleného ustáleného dotykového napětí $U_{Tp} = 75$ V pro dobu trvání $t_F \geq 5$ s.

Pro kroková napětí normy ČSN EN 61936-1 a ČSN EN 50 522 dovolené hodnoty nestanovují. Požadavky na dotykové napětí vyhoví i požadavkům na krokové napětí, protože meze dovoleného krokového napětí jsou značně vyšší než meze dotykového napětí (v důsledku různé proudové dráhy tělem). Vycházíme tak z předpokladu dodržení hodnot dovolených dotykových napětí. Na Obr. 5-2 je vidět znázornění dotykového a krokového napětí v závislosti na potenciálu země u konstrukce stožáru VN.



Obr. 5-2 Znárodnění dotykového a krokového napětí v závislosti na potenciálu země [3]

Skutečné dotykové napětí, které by se mohlo objevit na testovaném zemniči, se určí ze vztahu

$$U_T = U_{Tm} \cdot \frac{I_E}{I_M \cdot r} \quad (5.1)$$

- kde
- U_{Tm} napětí naměřené mezi zemničem a elektrodou simulující nohu (V)
 - I_M měřený zkušební proud (výstupní proud z CP CU1) (A)
 - I_E největší předpokládaný poruchový proud, který může zemničem protékat (A)
 - r redukční činitel vedení vůči vzdálenému zemniči (-)

Při ověřování dotykových a krokových napětí je možné pro výsledný proud uvažovat vliv těchto faktorů zavedením redukčního činitele r . Redukční činitel může být určen výpočtem nebo měřením. V případě vedení bez zemního lana a kabelu bez plášťů nebo pancéřování se uvažuje hodnota $r = 1$.

Hodnota největšího předpokládaného poruchového proudu I_E , který může zemničem protékat, závisí především na typu a rozsahu sítě, ve které se distribuční trafostanice nebo stožár VN nachází.

5.1 Měření dotykového a krokového napětí

Měření dotykového a krokového napětí se provádí za účelem [11]:

- a) ověření dotykového a krokového napětí u existujících elektrických stanic
- b) ověření vypočtených hodnot dotykového a krokového napětí při návrhu nové zemnicí soustavy (tyto hodnoty se mohou od naměřených hodnot vlivem aproximace při výpočtu lišit)

Zemnicí soustava elektrické stanice se navrhuje s ohledem na maximální dovolené hodnoty dotykového a krokového napětí uvnitř a v jejím okolí. Naměřené hodnoty dotykového a krokového napětí při poruše se mohou od hodnot při návrhu lišit. Proto je nutné tyto hodnoty v praxi ověřit měřením. Dotykové napětí je však často ovlivněno zavlečením potenciálu ze soustavy VN a proto je nepraktické a často nemožné provádět návrh zemnicí soustavy pouze s ohledem na dotykové napětí. Pro měření dotykového a krokového napětí se využívá stejná metoda injektáže proudu jako pro měření zemního odporu, která simuluje poruchu v síti. Zemí protéká zkušební proud přes testovanou zemnicí soustavu a vzdálenou proudovou elektrodu, která

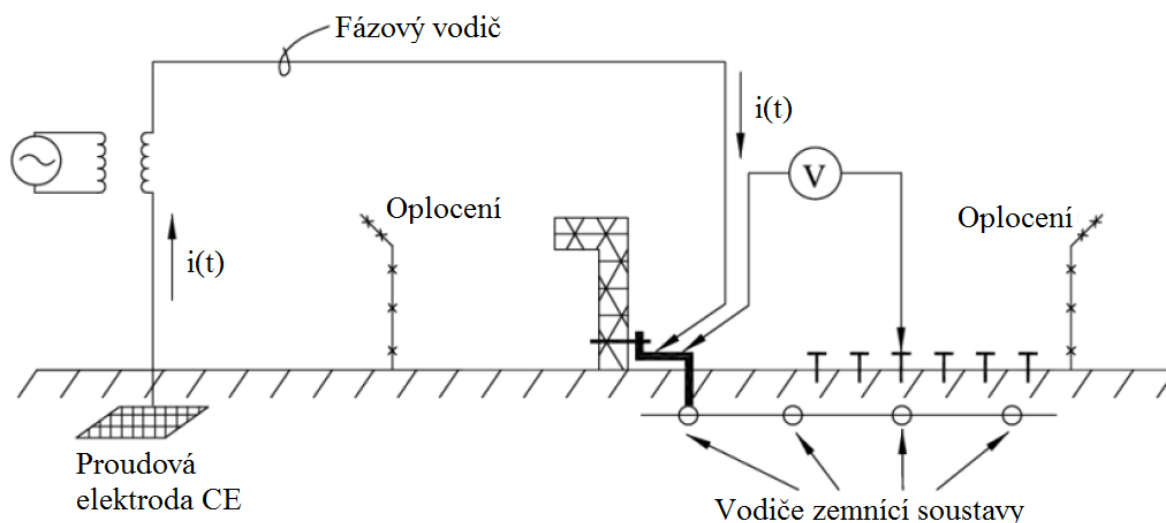
představuje referenční zem a není ovlivněna testovanou uzemňovací soustavou. Napětí je poté měřeno uvnitř a okolo testovaného objektu.

Jestliže může dojít k dotyku u nějaké části vzdálené alespoň 2 m okolo testovaného objektu, měří se dotykové napětí mezi dvěma elektrodami (ruka-ruka). Jestliže v této vzdálenosti 2 m k dotyku dojít nemůže, měří se dotykové napětí mezi rukou a nohou, které jsou ve vzdálenosti 1 m od testovaného objektu. Pro určení dotykového napětí je zapotřebí brát v úvahu odpor lidského těla $R_{BODY} = 1 \text{ k}\Omega$. Norma ČSN 33 3201 uvádí, že při měření dotykového a krokového napětí, musí mít měřící elektroda (představující chodidlo) celkovou plochu alespoň 400 cm^2 a musí být k zemi kolmo přitlačována silou alespoň 500 N (což odpovídá hmotnosti 50 kg) [14]. K zajištění bezpečnosti při měření dotykového a krokového napětí nám norma ČSN EN 50 522 uvádí maximální dovolené hodnoty, které závisí na velikosti a trvání poruchového proudu a odporu chodidla [3].

5.2 Metody měření dotykového a krokového napětí

5.2.1 Proudová metoda

Proudová metoda spočívá v injektáži proudu v rozsahu 100 – 200 A přes proudovou elektrodu a testovanou zemnicí soustavu. Tento proud způsobuje při průchodu zemí nárůst potenciálu, který je posléze měřen v okolí testované zemnicí soustavy pomocí frekvenčního voltmetru s adaptérem pro zařazení odporu $1 \text{ k}\Omega$, který představuje odpor lidského těla. Z tohoto důvodu bývá někdy označována také jako metoda frekvenční.



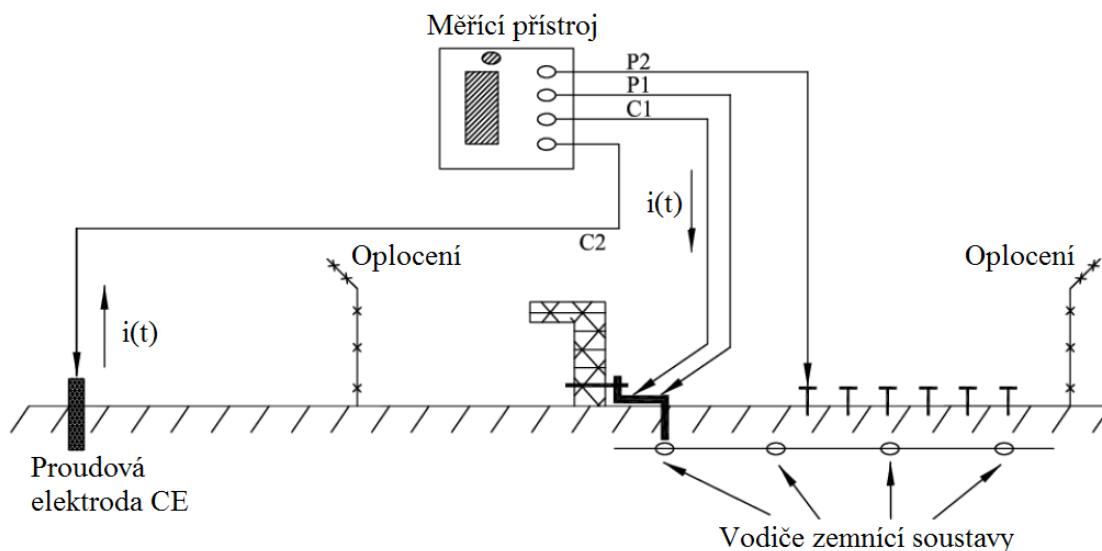
Obr. 5-3 Schéma zapojení pro měření dotykového a krokového napětí frekvenční metodou [11]

Při této metodě jsou většinou od měřené zemnicí soustavy všechna vedení přenosové i distribuční sítě odpojena. Zdroj proudu injektuje testovací proud přes fázové vodiče vedení až do námi měřené zemnicí soustavy. Zdroj proudu může být umístěn jak na straně proudové elektrody, která představuje referenční vzdálenou zem, tak na straně testované zemnicí soustavy.

5.2.2 Metoda využívající univerzálního měřicího přístroje

Tato metoda využívá stejného měřicího přístroje jako při měření zemního odporu metodou potenciálového spádu. Většina těchto zdrojů je napájena ze sítě nebo bateriemi a injektují testovací střídavý proud o frekvenci odlišné od síťové frekvence 50 Hz přes proudovou

elektrodu CE a testovanou zemnicí soustavu. Pomocí potenciálových elektrod je měřen následný nárůst potenciálu. Schéma zapojení měřicího přístroje je znázorněn na *Obr. 5-4*.



Obr. 5-4 Schéma zapojení pro měření dotykového a krokového napětí univerzálním měřicím přístrojem [11]

Měřicí přístroj měří zemní impedanci mezi zemnicí soustavou a námi měřeným místem. Vynásobením měřené impedance s testovacím „poruchovým“ proudem získáme hodnotu dotykového napětí v měřeném místě. Krokové napětí se určí pomocí rozdílu dotykových napětí ve dvou místech vzdálených 1 m od sebe.

5.3 Použité metody v praxi

V praxi bude využita metoda využívající injektáže proudu pomocí měřicího systému CPC 100 a jeho vazební jednotky CP CU1. Pro měření dotykového napětí bude využito frekvenčně selektivního voltmetru CP AL1 s připojeným odporníkem 1 k Ω , simulující odpor lidského těla. Měření bude probíhat na vybraných místech v okolí DTS, například mezi PEN můstkem v elektroměrovém rozváděči (umístěn přímo na domě, znázorněn na *Obr. 9-9*), stožárem DTS nebo ručním táhlem úsekového odpínače a elektrodou (noha) o ploše 400 cm² zatížená 50 kg vzdálená 1 m od místa měření.

6 PŘENOS POTENCIÁLU DO SÍTÍ NN

6.1 Zavlečený potenciál ze soustavy nad 1 kV do soustav NN

Zavlečený potenciál je dle [3] definován jako zvýšení potenciálu zemnicí soustavy způsobené proudem tekoucím do země pomocí připojeného vodiče (například kabel s kovovým pláštěm, PEN vodič, potrubí, kolejnice) do prostorů s nízkým nebo žádným navýšením potenciálu k referenční zemi; z těchto důvodů se následně objeví rozdíl potenciálu mezi vodičem a okolím.

Existují-li VN a NN uzemňovací soustavy ve vzájemné blízkosti a nejsou-li součástí celkové uzemňovací soustavy, část nárůstu potenciálu zemniče VN soustavy se může přenést do soustavy NN [3]. Nárůst potenciálu země (*EPR* nebo U_E) definuje norma [3] jako napětí mezi uzemňovací soustavou a referenční (vzdálenou) zemí a lze ho také stanovit dle vztahu (6.1).

$$U_E \leq F \cdot U_{Tp} \quad (6.1)$$

kde

U_E	nárůst potenciálu země (V)
U_{Tp}	skutečné dotykové napětí (V), odvozeno z <i>Obr. 5-1</i>
F	konstanta, v normálním případě rovna 2. Vyšší hodnoty se užívají, je-li vodič PEN přizemněn. U určitých typů půdy může být F až do 5. Pozornost se musí věnovat případu, kdy se tato pravidla aplikují v půdě s velkými rozdíly v rezistivitě, kde vrchní vrstva má vyšší rezistivitu. V tomto případě může dotykové napětí překročit hodnoty U_E o více než 50 % [3]

V praxi mohou nastat dva případy:

a) propojení VN a NN uzemňovacích soustav

Jestliže se soustava NN vyskytuje v plném rozsahu v prostoru uzemňovací soustavy VN, musí být obě uzemňovací soustavy propojeny. Pokud není uzemňovací soustava VN částí celkové uzemňovací soustavy, musí se aplikovat minimální požadavky uvedené v *Tab. 6-1*, aby se určily stavy, kdy je proveditelné propojení uzemňovacích soustav s napájecí sítí NN umístěné vně instalace VN [3].

b) rozdělení VN a NN uzemňovacích soustav

Jsou-li uzemňovací soustavy NN a VN oddělené, musí se zvolit takový způsob oddělení zemniců, který by nepředstavoval nebezpečí pro osoby nebo zařízení v instalacích NN. To znamená, že krokové a dotykové napětí, zavlečené potenciály a napěťové namáhání v instalaci NN způsobené poruchou ve VN jsou v přijatelných mezích. Tyto meze jsou uvedeny v *Tab. 6-1*.

Zvláštní pozornost musíme věnovat soustavám NN umístěným v zóně vlivu uzemňovací soustavy stanice VN. U průmyslových a komerčních instalací je všeobecně vhodným řešením společná uzemňovací soustava a to především z důvodu blízkosti zařízení, kde uzemňovací soustavy není možné oddělit.

Tab. 6-1 Minimální požadavky pro vzájemné propojení uzemňovacích soustav NN a VN vycházející na mezích nárůstu potenciálu země [3]

Typ sítě NN		Požadavky na meze nárůstu potenciálu země (U_E)		
		Dotykové napětí	Napět'ové namáhání	
			Doba trvání poruchy $t_f \leq 5$ s	Doba trvání poruchy $t_f \geq 5$ s
TT		Nemá význam	$U_E \leq 1200$ V	$U_E \leq 250$ V
TN		$U_E \leq F \cdot U_{Tp}$	$U_E \leq 1200$ V	$U_E \leq 250$ V
IT	Vyvedený ochranný vodič	Jako u TN sítě	$U_E \leq 1200$ V	$U_E \leq 250$ V
	Ochranný vodič není vyvedený	Nemá význam	$U_E \leq 1200$ V	$U_E \leq 250$ V

Typický případ zavlečení nebezpečného potenciálu nastává, jestliže se osoba stojící v blízkosti elektrické stanice dotkne vodiče, který je uzemněn v oblasti referenční (vzdálené) země nebo jestliže se osoba, která se nachází v místě referenční (vzdálené) země dotkne vodiče připojeného k uzemňovací soustavě dané elektrické stanice. Během poruchového stavu může dojít k vyrovnání či překročení (kvůli naindukování napětí na nechráněných komunikačních obvodech nebo vodním potrubí) výsledného potenciálu nad jeho nejvyšší hodnotu (GPR), která je dána součinem maximálního poruchového proudu a zemní impedance dané uzemňovací soustavy. Hodnota tohoto napětí může dosahovat tisíce voltů. Toto napětí (nebo jeho část) se může pomocí zemničů objevit na nepostižené straně. Může tak způsobit značné riziko, kterého je třeba se vyvarovat, aby nedošlo k ohrožení osob, zvířat a zařízení na nepostižené straně NN. Ve většině případů bude však rozdíl potenciálů velmi nízký a k ohrožení osob či zvířat by nemělo dojít. Avšak na druhou stranu může výskyt zavlečených potenciálů ovlivnit chod některých elektrických zařízení a může dojít ke zkrácení v měřicích přístrojích a elektronických zařízeních [15].

Mezi nejvýznamnější způsoby zavlečení potenciálu patří komunikační obvody, ploty, vodovodní potrubí, kovové pláště kabelů či kolejnice.

Praktiky, které se v praxi využívají k minimalizaci vlivu zavlečení nebezpečných potenciálů, jsou založeny na kombinaci znaleckého posudku, množství výpočtů či měření a podrobně jsou popsány v [15]. Jedná se především o správnou izolaci jednotlivých systémů či izolačních zařízení.

7 OBECNÉ ZÁSADY PŘI MĚŘENÍ ZEMNÍCÍCH SOUSTAV VN/NN SÍTÍ

U nově zřízených, rozšířených nebo rekonstruovaných uzemnění se musí před uvedením do provozu provést měření zemního odporu uzemnění jako celku a měření dotykových napětí. Výjimkou je případ, kdy se jedná o společné uzemňovací soustavy o rozloze větší než 10 000 m², tvořené vzájemně propojenými náhodnými a strojenými zemniči, u kterých se dle normy PNE 33 0000-1 ed.5 zemní odpor neměří [8].

Podle potřeby musíme po montáži zemnicí soustavy provést měření pro ověření návrhu. Měření mají zahrnovat v příslušných lokalitách měření odporu zemnicí soustavy, dovolená dotyková a kroková napětí a případně měření zavlčeného potenciálu.

Odpor uzemnění musí být z bezpečnostních důvodů měřen v rámci revizí oprávněnými revizními techniky, jak před uvedením daného zemněného objektu do provozu, během jeho provozování, tak i po případných opravách a rekonstrukcích, během nichž může dojít ke změnám v zemnicí soustavě.

7.1 Požadavky na měření

Obecné požadavky na měření lze rozdělit do 3 hlavních skupin:

Požadavky na bezpečnost: při měření by se především nemělo zapomínat na bezpečnost při práci, tj. bezpečnost obsluhy jak z hlediska nebezpečného dotykového napětí, tak i z hlediska jiných vlivů materiálů používaných při měření na lidský organizmus (vysoká elektromagnetická pole atd.). Z pohledu měřicích přístrojů se taky požaduje jejich zabezpečení proti zničení či poškození, a to elektrickým i neelektrickým vlivem. To znamená zabezpečení vůči přepětím, přepólování, anebo vůči teplotám mimo rozsah použití, případně mechanickým poškozením, jako například pád, chemické poškození atd. [16].

Požadavky na přesnost: jsou zcela individuální pro každé měření, protože pro různé oblasti použití je zapotřebí jiná přesnost měření. Je požadována určitá přesnost odečítání, tj. minimalizovat chybu lidského faktoru, např. paralaxní chybu. Dále adekvátní přesnost měřicího přístroje, která je dána konstrukcí a vlastnostmi daného přístroje. Nakonec je pro zajištění přesného měření potřeba eliminace, resp. minimalizace parazitních vlivů, které na měření působí a způsobují snížení přesnosti [16].

Požadavky na jednoduchost a přehlednost měření: velmi důležitý požadavek hlavně u rozsáhlejších měření, ale výhodný i pro menší měření. Je snaha umístit přístroje, zdroje a všechny zařízení měřicího systému tak, aby se v nich dalo lehce orientovat a snížilo se tak riziko chybného odečítání (lidský faktor) a také by došlo k zjednodušení nalezení případných chyb, které se při měření v zapojení mohou vyskytnout. Je výhodné si přístroje umístit tak, aby je obsluha dokázala ovládat a odečítat z jednoho místa [16].

7.2 Specifika a problémy při měření v praxi

Na měření však i při výběru nejideálnějších podmínek vždy působí několik parazitních vlivů, které nelze úplně eliminovat, lze je pouze minimalizovat.

Při měření zemních odporů, rezistivity půdy a potenciálních spádů se setkáváme s řadou problémů a parazitních vlivů, které negativně ovlivňují naměřené výsledky. Proto je v praxi v mnoha případech nezbytné měření několikrát opakovat a následně tyto naměřené výsledky

aproximovat. Mezi nejčastěji vyskytující se problémy při měření v praxi patří zemi protékající bludné proudy, vzájemná vazba mezi testovacími elektrodami a výskyt kovových předmětů v půdě.

7.2.1 Bludné střídavé proudy

Norma ČSN 33 2000-5-52 definuje bludné proudy jako takové elektrické proudy, které protékají v blízkosti umělých zdrojů elektrického proudu, například podél elektrifikovaných tratí nebo rozvodných sítí [17]. Bludné proudy tečou po dráze nejmenšího odporu (v zemi a kovových konstrukcích) nekontrolovatelně. Elektrolytickým působením (korozi) narušují podzemní potrubí a kabely nebo mohou mít nepříznivý vliv na jejich provozní bezpečnost. Jejich výskyt v zemi, v okolí testované zemnicí sítě a měřících elektrod, představuje parazitní vliv, který ovlivňuje výsledky měření. Při měření zemnicí soustavy může být tento efekt zmírněn použitím frekvence, která se nevyskytuje ve složkách bludných proudů. Většina měřících přístrojů používá frekvence v rozsahu od 50 do 100 Hz. Jako preventivní opatření proti účinkům bludných proudů se často vyžaduje použití filtrů nebo úzkopásmových měřících přístrojů [7].

7.2.2 Vzájemný vliv měřících elektrod

Měření zemní impedance velkých zemnicích soustav představuje požadavek na velké vzdálenosti mezi testovanou zemnicí soustavou a proudovou elektrodou (referenční vzdálenou zemí). Zemní odpor u těchto zemnicích soustav dosahuje velmi nízkých hodnot a tak při měření musíme zohlednit vzájemný vliv testovacích elektrod. Jakékoliv napětí, které vznikne při jejich vzájemném působení na potenciálové elektrodě způsobený proudem tekoucím přes proudovou elektrodu, se přičítá k výslednému měřenému napětí a vzniká chyba měření. Induktivní vazba dvou vzájemně paralelních testovacích elektrod dosahuje při síťové frekvenci 50 Hz hodnot až 0,1 W/100 m a může tedy dojít k výrazné chybě [7]. Naopak menší zemnicí soustavy se vyznačují větším zemním odporem a menší požadovanou vzdáleností mezi testovanou zemnicí soustavou a referenční (vzdálenou) zemí. Vzájemný vliv testovacích elektrod je u těchto zemnicích soustav zanedbatelný.

Jak už bylo zmíněno dříve, vzájemný vliv testovacích elektrod musíme zohlednit především při měření velkých zemnicích sítí s malým zemním odporem. Ten lze minimalizovat především jejich vhodným uspořádáním a umístěním potenciálové elektrody pod úhlem 90° s ohledem na průchod proudu přes proudovou elektrodu.

S rozvojem a průmyslovým růstem v těsné blízkosti elektrických rozvodů a stanic, je čím dál tím obtížnější zvolit vhodné místo a směr pro uložení testovacích elektrod při měření. Mezi další faktory negativně ovlivňující měření patří připojení nadzemních vedení, zakopaná vodovodní potrubí, pláště kabelového vedení a další kovové části, které nám ovlivňují a zkreslují výsledné naměřené hodnoty [7].

7.3 Zásady pro minimalizaci nepřesností při měření

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, k největším problémům při měření patří bludné proudy tekoucí zemi a vzájemný vliv mezi testovacími elektrodami. Vodivost půdy je v přírodě elektrolytická a na pomocných (testovacích) elektrodách se objevují zpětná napětí. Jednoduchý způsob, jak lze eliminovat elektrolytický efekt, je použitím střídavého testovacího proudu. Jestliže se jedná o proud síťové frekvence, elektrolyza není eliminována a střídavé bludné proudy síťové frekvence mohou ovlivnit naměřené výsledky. Na vyšších frekvencích je

vliv elektrolyzy zanedbatelný, ale vlastní a vzájemná impedance testovacích elektrod vzroste a mohou vzniknout chyby měření. Obvykle volíme pro měření frekvenci okolo 80 Hz [11].

S cílem minimalizovat nepřesnosti při měření rezistivity půdy a zemního odporu se doporučuje provádět tato měření při stejných povětrnostních podmínkách. Jestliže se však jedná o hodnoty, které budou použity při návrhu nové zemnicí soustavy, doporučuje se provádět všechna potřebná měření za odlišných povětrnostních podmínek. To pomůže při stanovení nejhorších možných stavů a limitních podmínek, zvláště pro menší zemnicí soustavy, které jsou ovlivněny sezónními změnami počasí [11].

8 NUMERICKÝ MODEL ZEMNÍCI SOUSTAVY

První praktická část diplomové práce se zabývá vytvořením numerického modelu zemnicí soustavy podpěrného bodu s úsekovým odpínačem v programu ANSYS Maxwell. Tento podpěrný bod se nachází v obci Čikov, v okrese Třebíč. Jedná se o úsekový odpínač pro připojení odběratelské trafostanice. Model bude sloužit k porovnání s reálnou zemnicí soustavou. Bude provedena simulace injektáže testovacího proudu do zemnicí soustavy a následné měření napětí v okolí testovaného zemniče pro určité směry měření.

8.1 Uzemnění úsekového odpínače

Rám, ruční pohon a popřípadě skříň pohonu úsekového odpínače musí být dle [8] připojeny na uzemnění. Místa pro připojení musí být vybavena uzemňovací svorkou, nebo FeZn páskem pro připojení uzemňovacího vodiče. Pro uzemňovací svorku musí být použit minimálně šroub M12 nebo 2x M10. Místo pro připojení musí být vybaveno značkou č. 5019 pro ochranné uzemnění podle IEC60417 DB. Části kovových konstrukcí spojené s uzemňovací soustavou je možné považovat za uzemňovací vodič, pokud splňují podmínky správného elektrického spojení (žebříky). Za uzemňovací vodič není možné považovat např. trubky táhel pohonů a stupadla. Ovládací páka pohonu musí být vodivě propojena s uzemněnou pevnou částí pohonu [18].

8.2 Příklad uzemnění úsekového odpínače v praxi

Jedná se o úsekový odpínač na venkovním vedení 22 kV. Celá zemnicí soustava se skládá z dvou ekvipotenciálních kruhů, naznačených na *Obr. 8-1*, pořízeném při rekonstrukci podpěrného bodu v srpnu 2016. Podpěrný bod byl zrekonstruován včetně úsekového odpínače a zemnicí soustavy.

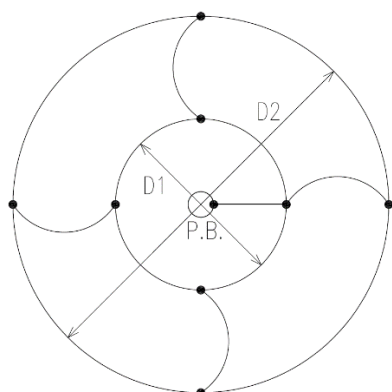


Obr. 8-1 Uzemnění úsekového odpínače pomocí dvou ekvipotenciálních kruhů

Pro připojení obou ekvipotenciálních kruhů se využívá zemnicí pásy. Nejčastěji se pro uzemnění elektrických zařízení a vodivých konstrukcí používá pásek FeZn 30x4 mm, který je díky svým vlastnostem a povrchovou ochranou žárovým zinkováním vhodný pro uložení jak v zemi, ale také pro instalaci po povrchu podpěrného bodu.

8.3 Vstupní parametry

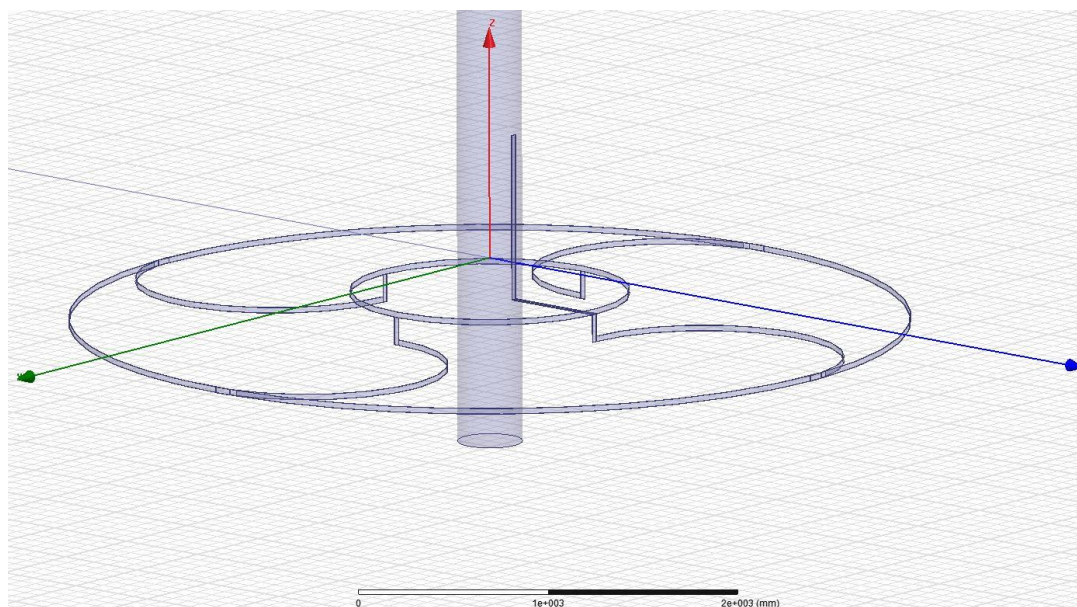
Mezi hlavní vstupní parametry při vytvoření numerického modelu zemnicí soustavy patří geometrické rozměry testované zemnicí soustavy, materiál využitý při její instalaci, rezistivita půdního podloží v jejím okolí a testovací proud. Tento proud představuje při simulaci reziduální proud zemního spojení, jehož velikost udává norma [3] jako 10 % kapacitního proudu dané oblasti I_C . Kapacitní proud ve vybrané distribuční soustavě dosahuje 85 A, reziduální proud I_{RES} je poté za tohoto předpokladu roven 8,5 A.



Vstupní parametry		
Popis		Poznámka
Obvod vnitřního kruhu	D1 = 1,5 m	v hloubce 0,2 m pod úrovní země
Obvod vnějšího kruhu	D2 = 4,5 m	v hloubce 0,4 m pod úrovní země
Vrchní vrstva půdy	$\rho_1 = 76 \Omega\text{m}$	vrchní vrstva půdy tloušťky 1m
Spodní vrstva půdy	$\rho_2 = 128,5 \Omega\text{m}$	hodnota měřená pro hloubku 10 m

Obr. 8-2 Vstupní parametry matematického modelu zemnicí soustavy úsekového odpínače Čikov

Hodnoty rezistivity půdy byly změřeny v okolí zemnicí soustavy a v programu byl vytvořen dvouvrstvý model půdy. Při simulaci byl injektován testovací proud přes zemnicí pásku, vyvedenou nad úroveň země, do zemnicí soustavy. Pomocí napětových přímek, představující napětové elektrody, bylo změřeno rozložení potenciálu v okolí testované zemnicí soustavy.



Obr. 8-3 Numerický model zemnicí soustavy v programu ANSYS Maxwell

8.4 Empirický výpočet zemního odporu

Pro potřeby porovnání hodnot zemního odporu získaného pomocí simulace a měření bude využit také empirický vztah pro výpočet odporu, uvedený v TNS 00 4910 společnosti E.ON [19]. Pro potřeby tohoto výpočtu byly využity parametry zemnicí soustavy úsekového odpínače, uvedené na Obr. 8-3 a pro rozsah rezistivity od minimální hodnoty ($\varphi_{E,\min} = 76 \Omega\text{m}$) po hodnotu

maximální ($\varphi_{E,max} = 128,5 \Omega m$) určen rozsah hodnot zemního odporu $R_{E,min}$ a $R_{E,max}$. Byl uvažován pouze jednovrstvý model půdy.

Výpočet zemního odporu jednoduchých zemniců dle [8], pro minimální naměřenou hodnotu rezistivity:

- Zemní odpor vnitřního obvodového zemniče o průměru $D_1=1,5$ m:

$$R_{EB1} = \frac{\rho_E}{\pi^2 \cdot D_1} \cdot \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot D_1}{d} = \frac{76}{\pi^2 \cdot 1,5} \cdot \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,5}{0,015} = 33,08 \Omega \quad (8.1)$$

- Zemní odpor vnějšího obvodového zemniče o průměru $D_2=4,5$ m:

$$R_{EB2} = \frac{\rho_E}{\pi^2 \cdot D_2} \cdot \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot D_2}{d} = \frac{76}{\pi^2 \cdot 4,5} \cdot \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot 4,5}{0,015} = 12,91 \Omega \quad (8.1)$$

- Zemní odpor dvojitého obvodového zemniče:

$$R_{EB} = \frac{R_{EB1} \cdot R_{EB2}}{R_{EB1} + R_{EB2}} \cdot \frac{1}{\eta_{12}} = \frac{33,08 \cdot 12,91}{33,08 + 12,91} \cdot \frac{1}{0,7} = 13,26 \Omega \quad (8.2)$$

η_{12} koeficient využití dílčích uzemnění, pro malé objekty a vzájemnou vzdálenost zemniců do 2 m, doporučuje $\eta_{12}=0,7$

- Zemní odpor propojovacího paprskového zemniče:

$$R_{Ep} = \frac{\rho_E}{\pi \cdot L} \cdot \ln \frac{2 \cdot L}{d} = \frac{76}{\pi \cdot 1,5} \cdot \ln \frac{2 \cdot 1,5}{0,015} = 85,45 \Omega \quad (8.3)$$

L délka paprskového nebo tyčového zemniče

d polovina šířky páskového zemniče (m)

- Výsledný odpor kombinovaného zemniče pro minimální rezistivitu $\varphi_{E,min} = 76 \Omega m$:

$$R_{EV,min} = \frac{1}{\frac{\eta_{pn} \cdot n}{R_{Ep}}} \cdot \ln \frac{1}{\eta} = \frac{1}{\frac{0,836 \cdot 4}{85,45}} \cdot \ln \frac{1}{0,9} = 9,701 \Omega \quad (8.4)$$

η_{pn} koeficient využití paprskových zemniců ($\eta_{pn} = 0,836$ pro $n = 4$)

n počet paprsků

η koeficient využití kombinace zemniců, doporučuje se $\eta = 0,9$

- Výsledný odpor kombinovaného zemniče pro maximální rezistivitu $\varphi_{E,max} = 128,5 \Omega m$:

$$R_{EV,max} = \frac{1}{\frac{\eta_{pn} \cdot n}{R_{Ep}}} \cdot \ln \frac{1}{\eta} = \frac{1}{\frac{0,836 \cdot 4}{144,48}} \cdot \ln \frac{1}{0,9} = 16,402 \Omega \quad (8.4)$$

Pro rozsah rezistivit ($\varphi_{E,min} = 76 \Omega m$, $\varphi_{E,max} = 128,5 \Omega m$) byl vypočten rozsah výsledných odporů kombinovaného zemniče úsekového odpínače ($R_{E,min} = 9,701 \Omega$, $R_{E,max} = 16,402 \Omega$). Výsledný odpor se pohybuje v těchto mezích. Tyto hodnoty budou porovnány s výslednou naměřenou hodnotou zemního odporu a hodnotou určenou pomocí simulace v kapitole 9.2.2.

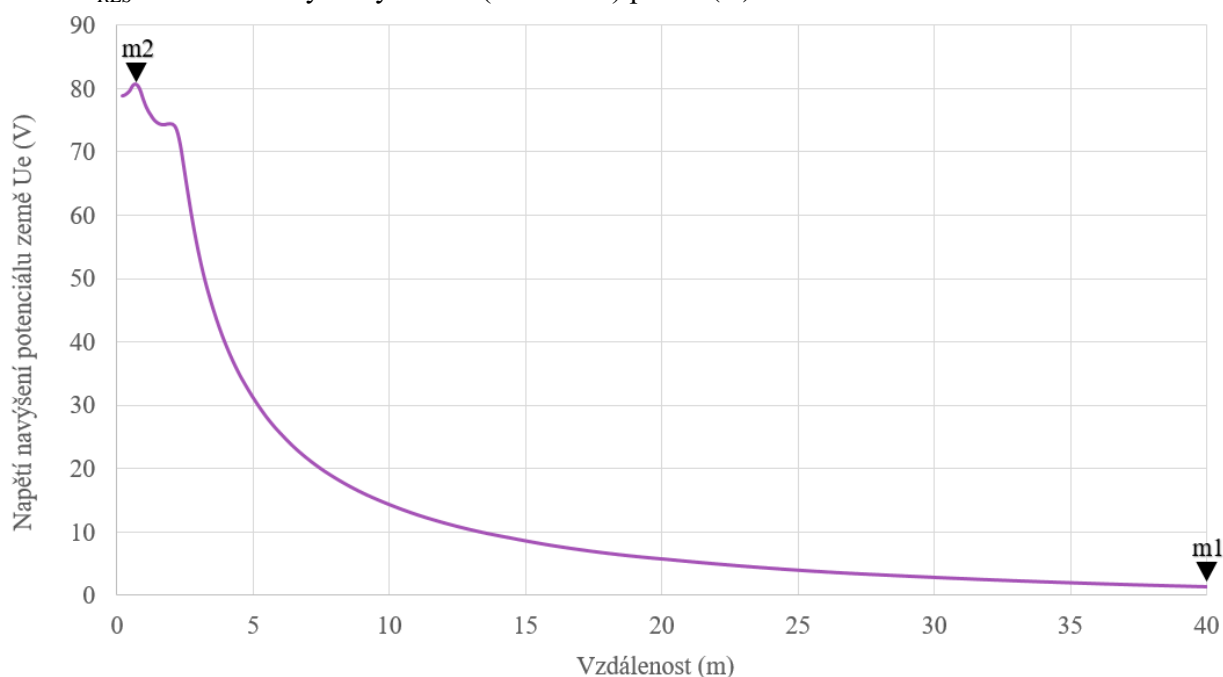
8.5 Výsledky simulace

8.5.1 Zemní odpor

Pomocí napěťové přímky PO0 ve směru B (viz popis měřených os v kapitole 9.2.3), která představuje napěťovou elektrodu ve vzdálenosti 40 m od měřené zemnicí soustavy, byl v tomto bodě určen nárůst potenciálu země U_E . Poté byl pomocí Ohmova zákona vypočten zemní odpor R_{E_sim} .

$$R_{E_sim} = \frac{U_{E_sim}}{I_{RES}} \quad (8.5)$$

kde R_{E_sim} hodnota zemního odpor při simulaci ZS (Ω)
 U_{E_sim} hodnota nárůstu potenciálu země při simulaci ZS (V)
 I_{RES} zbytkový zemní (residuální) proud (A)



Obr. 8-4 Výsledek simulace rozložení potenciálu země ve směru B do vzdálenosti 40 m od podpěrného bodu

Z grafické závislosti navýšení potenciálu země U_E na vzdálenosti od zemnicí soustavy podpěrného bodu ve směru B (viz Obr. 8-4) byl odečten rozdíl potenciálů mezi body m1 (40 m) a m2 (0,7 m).

$$U_{E_sim} = U_{Em2} - U_{Em1} = 80,65 - 1,44 = 79,21 \text{ V}$$

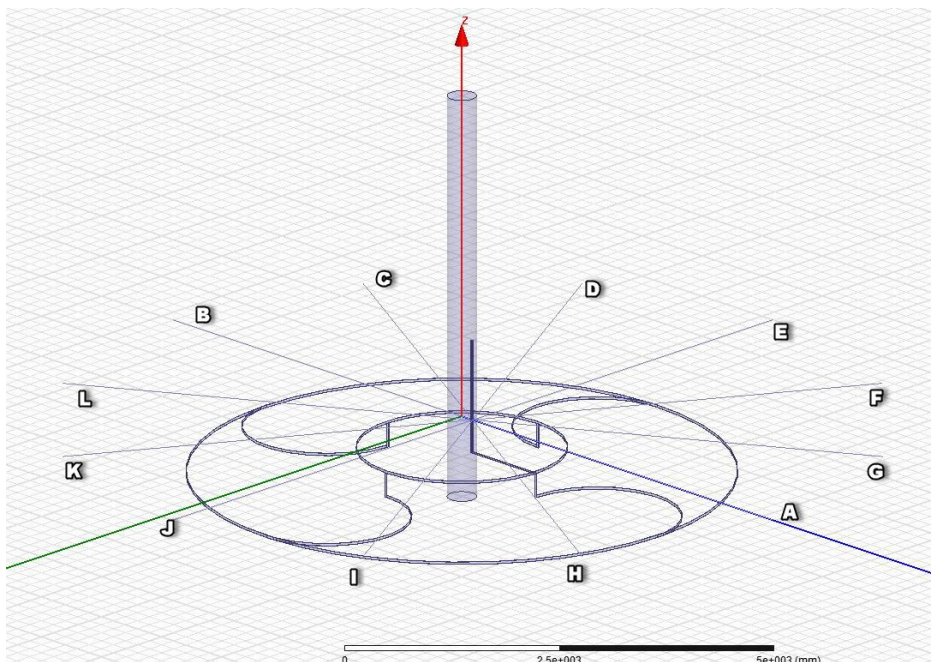
Dosazením do vztahu 8.1 byl pomocí Ohmova zákona vypočítán zemní odpor R_E . Tento odpor je následně porovnán v kapitole 9.2.2 s hodnotou získanou během měření zemního odporu $R_{E_měř}$.

$$R_{E_sim} = \frac{U_{E_sim}}{I_{RES}} = \frac{79,21}{8,5} = 9,319 \Omega \quad (8.1)$$

8.5.2 Rozložení potenciálu povrchu země

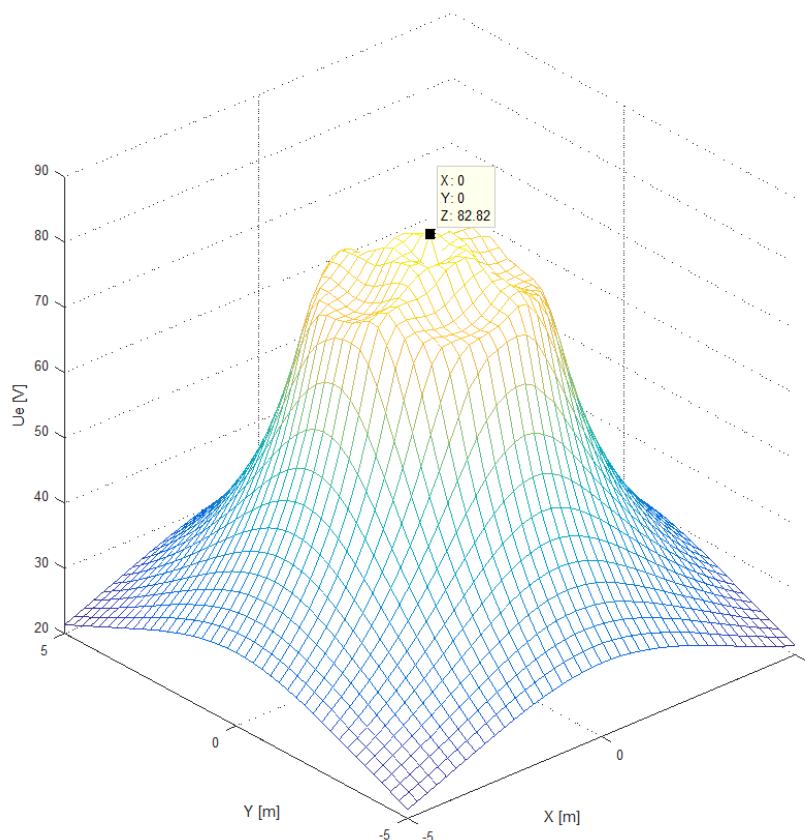
V rámci numerického modelu zemnicí soustavy bylo pomocí napěťových přímek PO vyjádřeno rozložení potenciálu v okolí zemnicí soustavy do vzdálenosti 5 m. Jednotlivé přímky

PO (směry A až L) jsou vůči sobě posunuty o 30° a výsledné grafické závislosti pro všechny tyto přímky jsou obsaženy v příloze B této práce.



Obr. 8-5 Numerický model zemní soustavy s naznačením směrů simulace rozložení potenciálu

Výsledky simulace byly poté vyexportovány a pro lepší názornost byl v programu MATLAB vytvořen 3D graf rozložení potenciálu země v okolí zemní soustavy, viz Obr. 8-6. Porovnání výsledků simulace a měření rozložení potenciálu země je provedeno v kapitole 0.



Obr. 8-6 3D graf rozložení potenciálu z výsledků simulace

9 MĚŘENÍ ZEMNÍČÍCH SOUSTAV V PRAXI

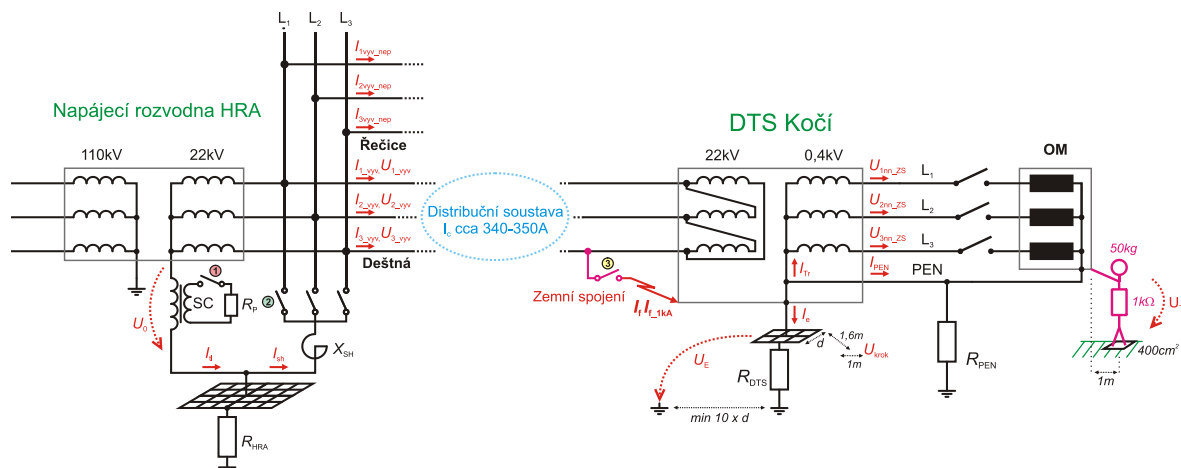
9.1 Měření zemnicí soustavy DTS v obci Klenov

9.1.1 Úvod

V rámci praktické části diplomové práce bylo nejprve provedeno frekvenční měření (metoda potenciálového spádu) zemnicí soustavy u vybrané DTS a poté bylo, při experimentálním ověření automatiky přizemnění postižené fáze PPF v distribuční soustavě 22 kV, provedeno také silové měření. Kapacitní proud I_C vybrané distribuční soustavy se pohyboval během měření v rozsahu 340 - 350 A. Pro účely měření byla vyjimečně daná soustava provozována pouze přes jednu zhašecí tlumivku TL1.

Pro možnost porovnání a ověření výsledků byly provedeny 2 typy měření. Silové měření, které využívá pro záznam naměřených hodnot jednotlivé kanály osciloskopu a frekvenční měření, které využívá metody potenciálového spádu a měřicího systému OMICRON. Tato metoda je popsána v kapitole 4.1.1.

9.1.2 Měřené veličiny



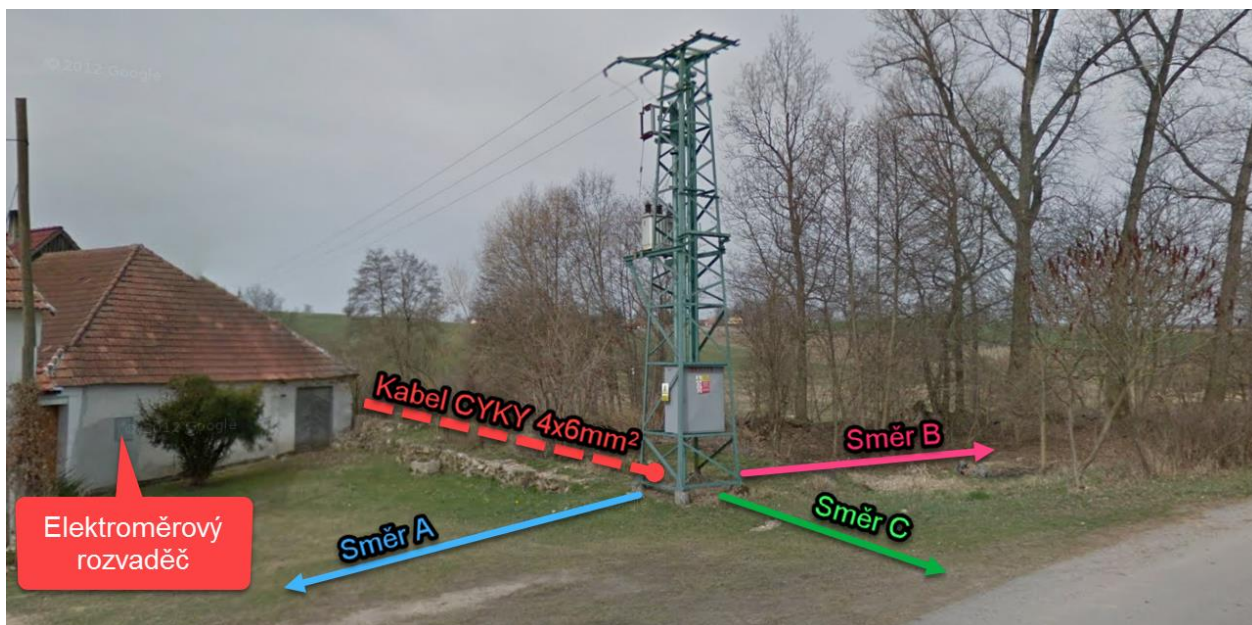
Obr. 9-1 Zjednodušené schéma experimentálního měření a zaznamenávaných veličin

Pro účely zaznamenání všech měřených veličin, byl v místě poruchy instalován osciloskop Yokogawa DL850, který monitoroval poruchový proud a jeho rozložení v zemnicí soustavě DTS, napětí na NN straně distribučního transformátoru (DT), napětí navýšení potenciálu U_E napájecí rozvodny, dotykové napětí U_T a krokové napětí U_K .

Měření poruchového proudu bylo realizováno pomocí dvou kleští Chauvin Arnoux C173 s rozsahem 100 A resp. 1 kA. Proud PEN vodičem, uzlem DT a proud tekoucí do zemnicí soustavy se měřil pomocí proudových převodníků Chauvin Arnoux C173 s rozsahem 100 A, 10 A a 100 A. Fázová napětí v místě poruchy se měřila přímo na NN straně DT přes napěťové sondy 10:1 V. Napětí navýšení potenciálu, dotykové a krokové napětí se měřilo přes napěťové sondy 10:1. Úbytek napětí na odporu poruchy se měřil pomocí napěťového děliče s převodem 10000/1V.

9.1.3 Frekvenční měření

Měření probíhalo dne 10. listopadu 2016 v odpoledních hodinách za mírné oblačnosti beze srážek. Měřicí systém CPC 100 a jeho vazební jednotka CP CU1 byly zapojeny dle schématu zapojení na *Obr. 4-5* a umístěny poblíž DTS, ze které byl systém napájen. Napěťové sondy byly z důvodu lepší názornosti rozložení potenciálu v okolí DTS umístěvány ve třech směrech od DTS (směry A, B, C - *Obr. 9-2*). Pro všechny výpočty byl uvažován poruchový zemní proud $I_E = 12,1$ A, naměřený při silovém měření, a to ve stavu s ustáleným zemním spojením.



Obr. 9-2 Naznačené směry měření rozložení potenciálu země u DTS Kočí

9.1.3.1 Měření zemního odporu

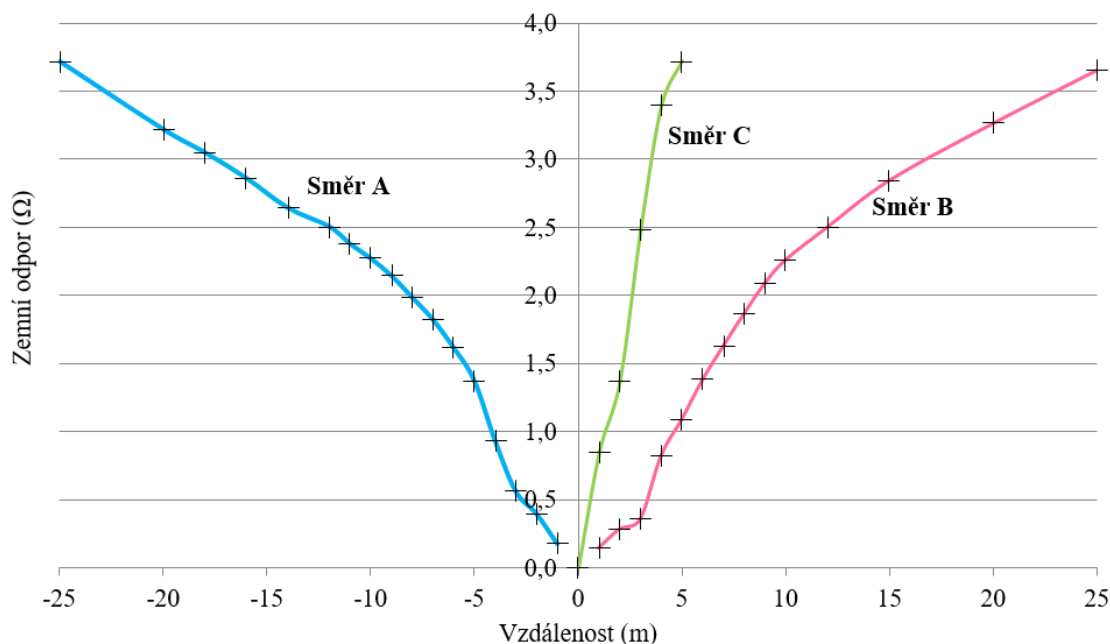
Měření probíhalo pomocí injektáže testovacího proudu přes proudovou elektrodu propojenou se zemnicí soustavou pomocí silového kabelu CYKY 5x6 mm². Proudový výstup z měřicího systému je připojený k zemnicí soustavě DTS na zemnicí pásku. Při jednotlivých krocích měření byly od měřené DTS postupně umístěvány napěťové elektrody, ve směrech naznačených na *Obr. 9-2*. Při tomto měření měřicí systém zaznamenává hodnotu zemní impedance. Avšak její imaginární část dosahuje ve srovnání s reálnou částí (zemním odporem), velmi nízké úrovně a pro následující potřeby bude využíván pouze zemní odpor R_E , jehož hodnoty byly v každém kroku zaznamenány a poté vyjádřeny v závislosti na vzdálenosti.

Při měření vznikla oproti měření silovou metodou velká nepřesnost vlivem velkého přechodového odporu v místě umístění měřicí elektrody. Výsledná hodnota zemního odporu ve vzdálenosti 25 m od DTS ve směru A pro frekvenční měření a hodnota zemního odporu pro měření silové:

- Frekvenční měření $R_{E\text{frek}} = 21,102 \Omega$
- Silové měření $R_{E\text{silové}} = 3,72 \Omega$

Z těchto důvodů bylo nutné hodnotu zemního odporu při frekvenčním měření upravit a přepočítat na hodnotu naměřenou při silovém měření a jednotlivé výsledky korigovat a poté vynést do grafu. Grafické závislosti změny naměřeného zemního odporu, závislého na vzdálenosti od

měřené DTS, jsou zobrazeny na Obr. 9-3. Z těchto závislostí lze pozorovat, že s rostoucí vzdáleností, roste i zemní odpor R_E .



Obr. 9-3 Grafická závislost zemního odporu na vzdálenosti od DTS

9.1.3.2 Měření rozložení potenciálu

Mezi nejdůležitější měření zemnicích soustav patří měření rozložení potenciálu. Pomocí těchto závislostí lze určit místo největšího poklesu či nárůstu potenciálu a určit tak pravděpodobné umístění a rozsah zemnicí soustavy. Z této grafické závislosti lze také určit hodnotu dotykového napětí při dotyku osoby ve vzdálenosti 1 m od místa měření nebo hodnotu krokového napětí, jehož nejvyšší hodnota se nachází na okraji zemnicí soustavy.

Výpočet rozložení potenciálu povrchu země:

$$U_E = (R_{E,max} - R_{Ex}) \cdot I_E \quad (9.1)$$

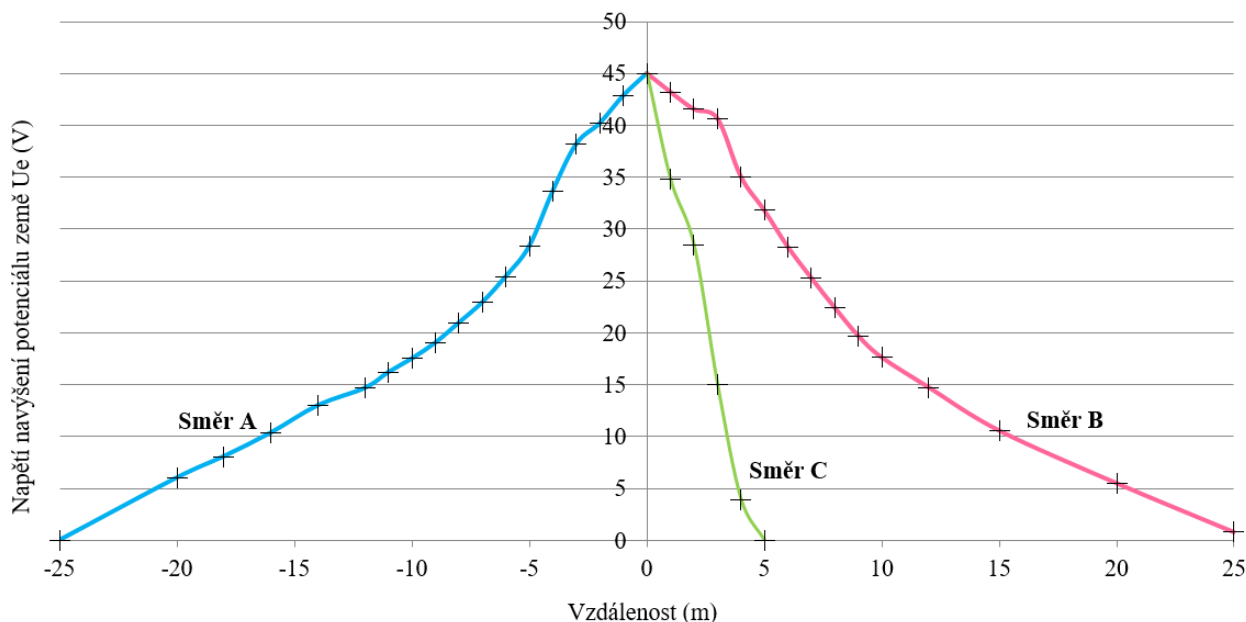
kde	U_E	rozložení potenciálu povrchu země (V)
	$R_{E,max}$	max. naměřený zemní odpor ve vzdálenosti 25 m od DTS (= 3,72 Ω)
	R_{Ex}	zemní odpor naměřený měřícím systémem v určité vzdálenosti od DTS (Ω)
	I_E	poruchový zemní proud, získaný při silovém měření (= 12,1 A)

Výpočet rozložení potenciálu povrchu země ve směru A ve vzdálenosti 4 m od DTS:

$$U_{E_A4m} = (3,72 - 0,94) \cdot 12,1 = 33,64 \text{ V}$$

Výpočet rozložení potenciálu povrchu země ve směru B ve vzdálenosti 4 m od DTS:

$$U_{E_B4m} = (3,72 - 0,82) \cdot 12,1 = 35,09 \text{ V}$$



Obr. 9-4 Graf rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemniče pro zemní proud 12,1 A

Odchyłka mezi naměřenými hodnotami může být způsobena umístěním potenciálové elektrody v opačném směru od testované zemnicí soustavy nebo odlišnou hodnotou rezistivity půdy, která může mít za následek odlišné hodnoty zemního odporu.

9.1.3.3 Měření dotykového napětí

Měření dotykového napětí v okolí DTS bylo provedeno za pomoci měřicího systému CPC 100, jeho vazební jednotky CP CU1 a frekvenčně selektivního voltmetru CP AL1. Toto měření probíhalo na vybraných místech v okolí DTS. Během měření bylo měřeno dotykové napětí mezi PEN můstkem v elektroměrovém rozváděči (umístěn přímo na domě, znázorněn na Obr. 9-2) nebo stožárem DTS a elektrodou (noha) o ploše 400 cm² zatížená 50 kg vzdálená 1 m od místa měření. Pro měření dotykového napětí byl uvažován odpor lidského těla 1 kΩ.

Výsledky byly za pomoci speciálních šablon v programu CPC Excel File Loader přepočteny na hodnoty skutečného dotykového napětí, které by se mohlo objevit na testovaných místech. Toto napětí se určí ze vztahu (5.1).

Skutečné dotykové napětí, které by se mohlo objevit na testovaném zemniči, se určí ze vztahu:

$$U_T = U_{Tm} \cdot \frac{I_E}{I_M \cdot r} \quad (5.1)$$

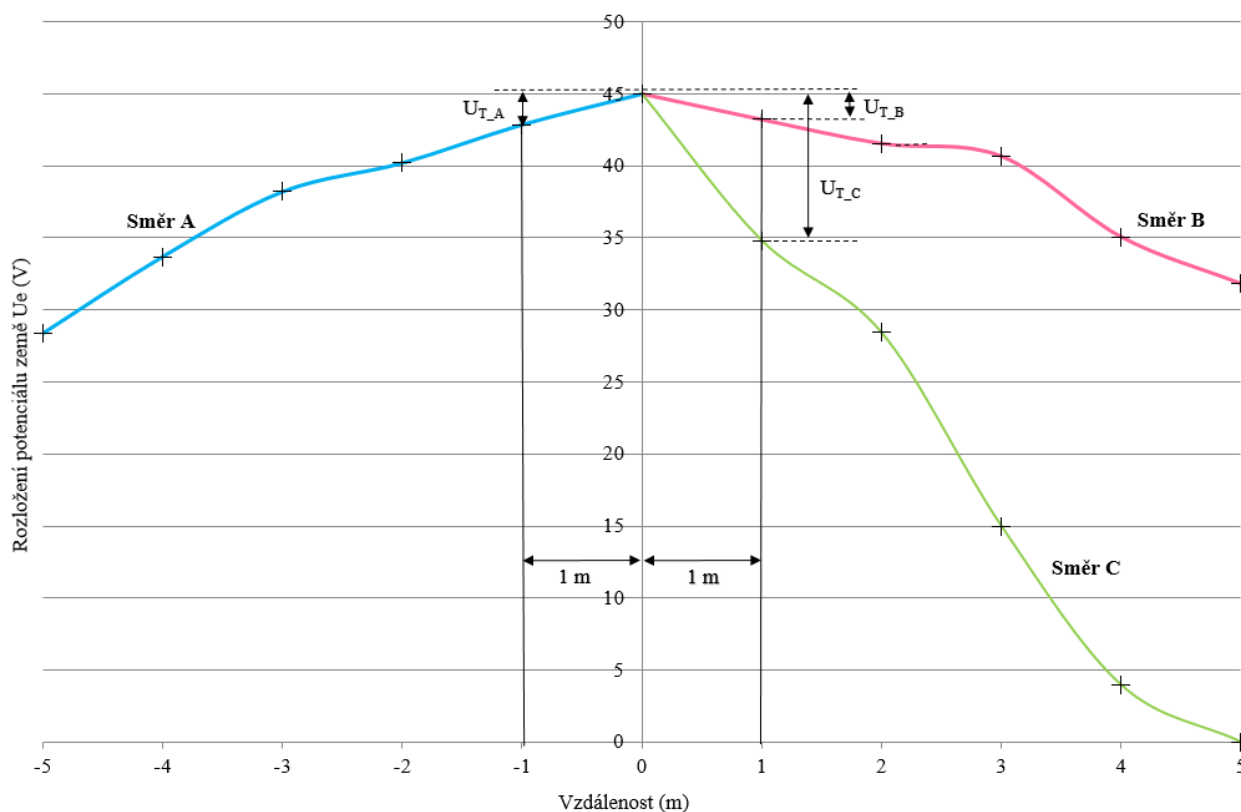
kde U_{Tm} napětí naměřené mezi zemničem a elektrodou simulující nohu (V)
 I_M měřený zkušební proud (výstupní proud z CP CU1) (A)
 I_E poruchový zemní proud, získaný při silovém měření (A)
 r redukční činitel vedení vůči vzdálenému zemniči, bez zemního lana a kabelu bez plášťů nebo pancérování se však udává hodnota $r = 1$.

Tab. 9-1 Měření dotykového napětí v okolí DTS pro poruchový zemní proud 12,1 A

Frekvence, ve které probíhalo měření:		30 Hz	70 Hz	Poznámka:	
Proud nastavený měřicím systémem (A):		100	100		
Proud měřený na výstupu CP CU1 (A):		2,5	2,5		
Zemní (poruchový) proud I_E (A):		I_E 12,1			
Umístění	$U_{V\text{-metr}}$ (V):		Skutečné dotykové napětí U_T (V)		
	30,0 Hz	70,0 Hz			
Bod č. 1	0,332	0,62	2,304		Elektroměr. rozvaděč na domě
Bod č. 2	0,033	0,059	0,223		Stožár DTS - směr A
Bod č. 3	0,032	0,055	0,211		Stožár DTS - směr B
Bod č. 4	0,036	0,062	0,237	Stožár DTS - směr C	

Příklad výpočtu dotykového napětí mezi místem měření (rozvaděč na nedalekém objektu) a elektrodou (noha) vzdálenou 1 m v bodě č. 1:

$$U_{T2} = \frac{U_{T,30\text{Hz}} + U_{T,70\text{Hz}}}{2} \cdot \frac{I_E}{I_M \cdot r} = \frac{0,332 + 0,62}{2} \cdot \frac{12,1}{2,5 \cdot 1} = 2,304 \text{ V} \quad (5.1)$$



Obr. 9-5 Určení dotykového napětí z grafu rozložení potenciálu země

Dotykové napětí může být určeno také z grafické závislosti rozložení potenciálu země v okolí testované zemnicí soustavy, viz Obr. 5-2 Znázornění dotykového a krokového napětí v závislosti na potenciálu země [3]. Dotykové napětí bylo měřeno ve vzdálenosti 1 m od stožáru DTS ve směrech A, B a C. Ze znalosti definice dotykového napětí lze vyjádřit dotykové napětí jako rozdíl dvou různých míst s rozdílným potenciálem.

$$U_{T_vyp.} = U_{E_0m} - U_{E_1m} \quad (9.2)$$

kde $U_{T_vyp.}$ vypočtená hodnota dotykového napětí (V)
 U_{E_0m}, U_{E_1m} naměřené hodnoty nárůstu potenciálu země v určité vzdálenosti od stožáru DTS (V)

Příklad výpočtu dotykového napětí ve směru A ve vzdálenosti 1 m od stožáru DTS:

$$U_{T_Avyp.} = 45,01 - 42,87 = 2,14 \text{ V} \quad (9.2)$$

Tab. 9-2 Hodnoty dotykového napětí určené z grafu rozložení potenciálu země

	Směr A	Směr B	Směr C
$U_{T_vyp.}$ (V)	2,14	1,79	10,2

Takto určené hodnoty dotykového napětí jsou především z důvodu absence přídavného odporu, simulujícího odpor lidského těla, pouze informativní a neodpovídají skutečným hodnotám získaných při frekvenčním a silovém měření.

9.1.3.4 Měření krokového napětí

Krokové napětí bylo měřeno v místě před rozváděčem DTS, jak je zobrazeno na Obr. 9-10, vzdálenost od armatury DTS na střed kroku byla 1,6 m, délka kroku 1 m, velikost elektrody noha byla 200 cm², každá elektroda (noha) byla zatížena 25 kg (25 l kanystr). Pro měření krokového napětí nabyła uvažována přídavná izolace a byl uvažován konstantní odpor lidského těla 1 kΩ.

Hodnota krokového napětí byla, obdobně jako hodnota dotykového napětí, přepočítána na skutečnou hodnotu pomocí speciálních šablon v programu CPC Excel File Loader od firmy OMICRON.

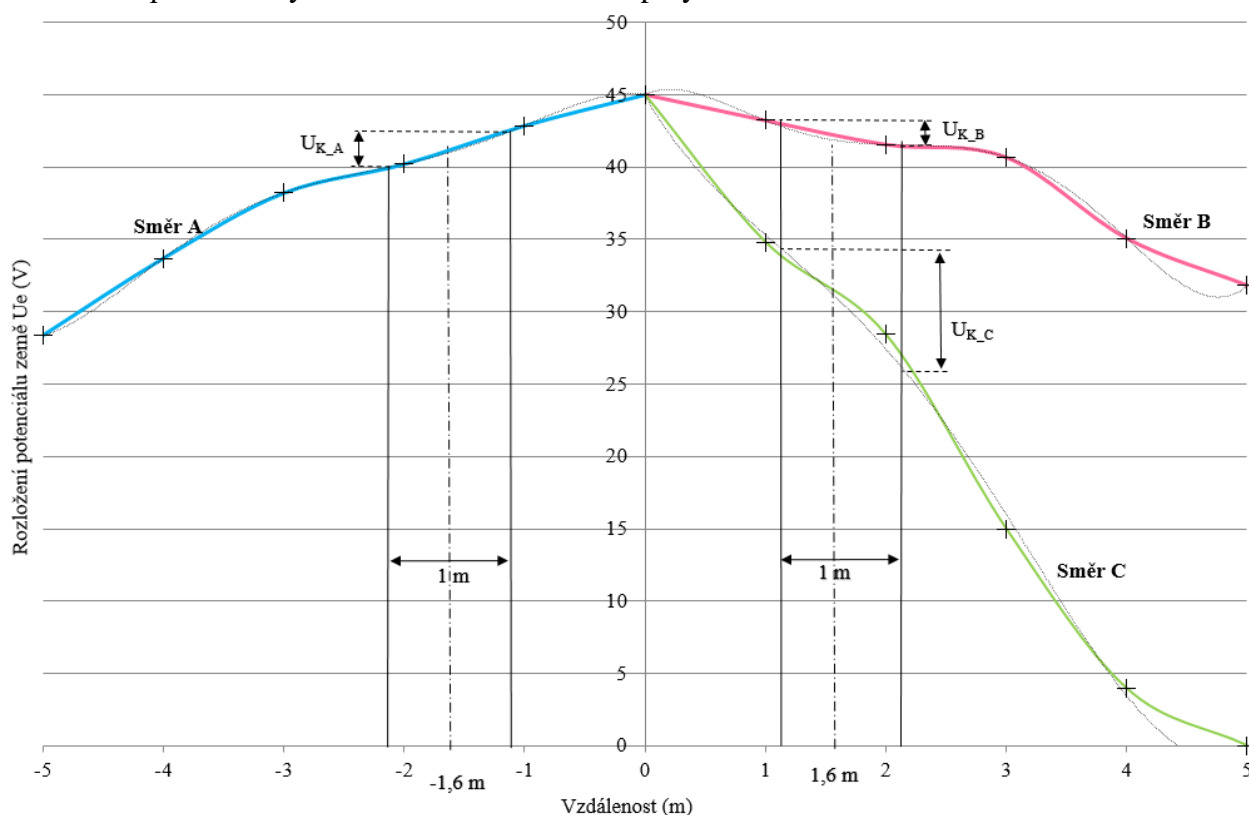
Tab. 9-3 Měření krokového napětí v okolí DTS pro zemní poruchový proud 12,1 A

Frekvence, ve které probíhalo měření:		30 Hz	70 Hz	Poznámka:	
Proud nastavený měřicím systémem (A):		100	100		
Proud měřený na výstupu CP CU1 (A):		2,5	2,5		
Zemní (poruchový) proud I_E (A):		I_E 12,1			
Umístění	U_{V_metr} (V):		Skutečné krokové napětí U_K (V)		
	30,0 Hz	70,0 Hz			
Bod č. 1	0,12	0,22	0,823		Stožár DTS - směr A
Bod č. 2	0,1	0,19	0,702		Stožár DTS - směr B
Bod č. 3	0,11	0,21	0,774	Stožár DTS - směr C	

Příklad výpočtu skutečného krokového napětí ve vzdálenosti 1,6 m od místa měření (stožárem DTS) mezi dvěma elektrodami (simulující nohy) vzdálenými od sebe 1 m v bodě č. 1:

$$U_{K1} = \frac{U_{K,30Hz} + U_{K,70Hz}}{2} \cdot \frac{I_E}{I_M \cdot r} = \frac{0,12 + 0,22}{2} \cdot \frac{12,1}{2,5 \cdot 1} = 0,823 \text{ V} \quad (9.2)$$

Také krokové napětí může být určeno z grafické závislosti rozložení potenciálu země v okolí testované zemnicí soustavy, viz *Obr. 9-6*. Hodnoty krokového napětí byly pro všechny 3 směry (A, B, C) zjištěny pomocí proložení grafických závislosti polynomem 4. a 5. řádu a dále určeny dosazením požadovaných vzdáleností do rovnice polynomu.



Obr. 9-6 Určení krokového napětí z grafu rozložení potenciálu země

- rovnice polynomu získaná v programu Excell

- $x = -1,1$ m

$$U_{E_{A1,1m}} = -0,0772 \cdot (-1,1)^5 - 0,9548 \cdot (-1,1)^4 - 3,9967 \cdot (-1,1)^3 - 6,7274 \cdot (-1,1)^2 - 1,4688 \cdot (-1,1) + 45,012 = 42,534 \text{ V}$$

- $x = -2,1$ m

$$U_{E_{A2,1m}} = -0,0772 \cdot (-2,1)^5 - 0,9548 \cdot (-1,1)^4 - 3,9967 \cdot (-2,1)^3 - 6,7274 \cdot (-2,1)^2 - 1,4688 \cdot (-2,1) + 45,012 = 40,027 \text{ V}$$

Výpočet krokového napětí ve vzdálenosti 1,6 m od měřené zemnicí soustavy ve směru A:

$$U_{K_{Avyp.}} = U_{E_{A1,1m}} - U_{E_{A2,1m}} = 42,534 - 40,027 = \mathbf{2,506 \text{ V}} \quad (9.5)$$

Tab. 9-4 Hodnoty krokového napětí určené z grafu rozložení potenciálu země

	x (m)	U_E (V)	$U_{K_{vyp.}}$ (V)
Směr A	-1,1	42,534	2,506
	-2,1	40,027	
Směr B	1,1	42,905	1,372
	2,1	41,533	
Směr C	1,1	34,591	8,123
	2,1	26,468	

9.1.4 Silové měření

Při tomto měření byla na vývodu ASJ33 Deštná v místě distribučního transformátoru (DT) Kočí (č. 10015128) - Dolní Mlýn, napájeném z rozvodny VVN/VN Jindřichův Hradec, simulována vlastní porucha - zemní spojení. Tento transformátor napájí pouze jedno odběrné místo (OM). Příslušné OM bylo po celou dobu experimentálního měření odpojeno od napájení (vytaženy pojistky v HDS a rozepnut hlavní jistič v DTS).

Měření probíhalo také dne 10. listopadu 2016 v odpoledních hodinách za mírné oblačnosti se srážkami. Z tohoto důvodu musíme brát v potaz vliv nižší rezistivity půdy a tedy i nižšího odporu zemnicí soustavy. Toto měření probíhalo při simulaci 1-fázové poruchy - zemního spojení. Vlastní porucha byla realizována propojením vybrané fáze L_1 se zemnicí soustavou dané DTS přes jednopólový vypínač (Obr. 9-7) a to buď přímo (kovové zemní spojení) nebo přes elektrolytický odpor (odporové ZS) či poškozený kabel (obloukové ZS) v závislosti na typu simulované poruchy. V případě vyhodnocení uvedené v této práci byly využity naměřené hodnoty při kovovém přizemnění fáze L_1 na zemnicí soustavu DTS (test 1).



Obr. 9-7 Místo zemního spojení v DTS Kočí

Pro záznam poruchového proudu v místě poruchy byl využit osciloskop Yokogawa DL850. Měření poruchového proudu bylo realizováno pomocí dvou kleští Chauvin Arnoux C173 s rozsahem 100 A resp. 1 kA. Napětí navýšení potenciálu, dotykové a krokové napětí se měřilo přes napěťové sondy 10:1.

Tab. 9-5 Tabulka zaznamenaných veličin při simulaci kovového zemního spojení (test 1)

<i>Test 1</i>	U_E	I_E	R_{DTS}	U_T	U_K
	(V)	(A)	(Ω)	(V)	(V)
ZS	61,17	12,1	3,72	12,72	1,84
ZS + R	128,7	26,08	3,7	26,63	3,79

Pozn.:

Tyto hodnoty byly vyhodnocovány ve dvou ustálených stavech experimentálního měření, a to ve stavu s ustáleným zemním spojením (ZS) a ustáleným zemním spojením s připnutým pomocným odporníkem v čase $t=0,9$ s (ZS+R).

Popis zaznamenaných veličin a obsazení jednotlivých měřicích kanálů:

t – časová osa - vznik zemního spojení v čase 0 s

U_E – napětí navýšení potenciálu postižené DTS (sonda 10:1), 200V/div, CH4 - umístěna ve vzdálenosti 90 m

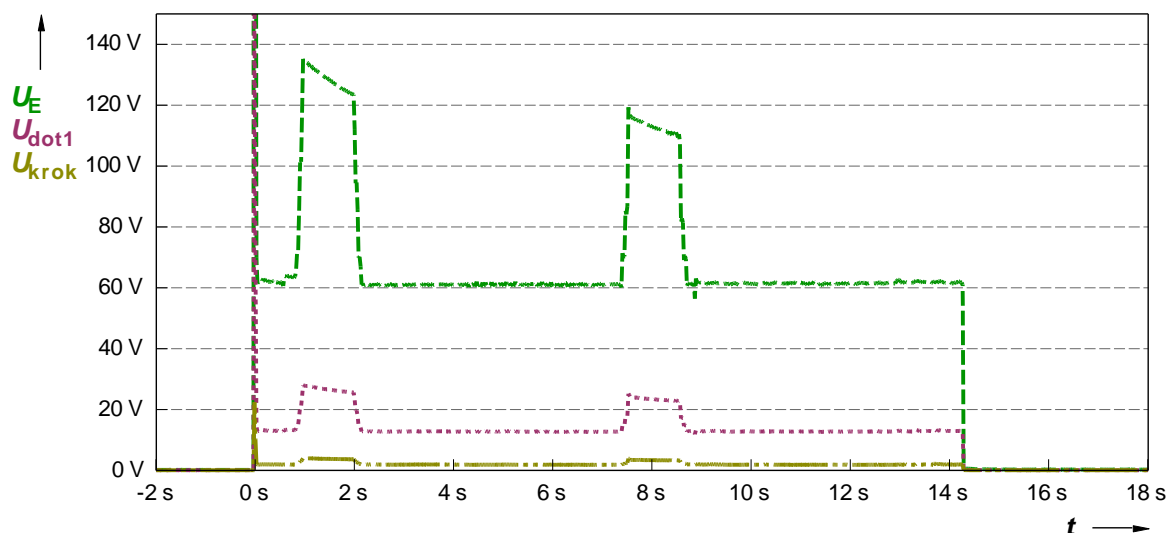
R_{DTS} – celkový odpor zemnicí soustavy DTS

I_E – zemní proud (do zemnicí soustavy DTS) (C kleště 100A), 10mV/A, 20V/div, CH11

U_T – dotykové napětí v místě poruchy (20m kabel) (sonda 10:1), 50V/div, CH5

U_K – krokové napětí v oblasti cca 1,6 m od DTS (na střed kroku) - (sonda 10:1), 20V/div, CH6

Pro vynesení a zobrazení všech naměřených veličin byl využit program FlexPro10 od německé společnosti Weisang GmbH (<http://www.weisang.com/>).

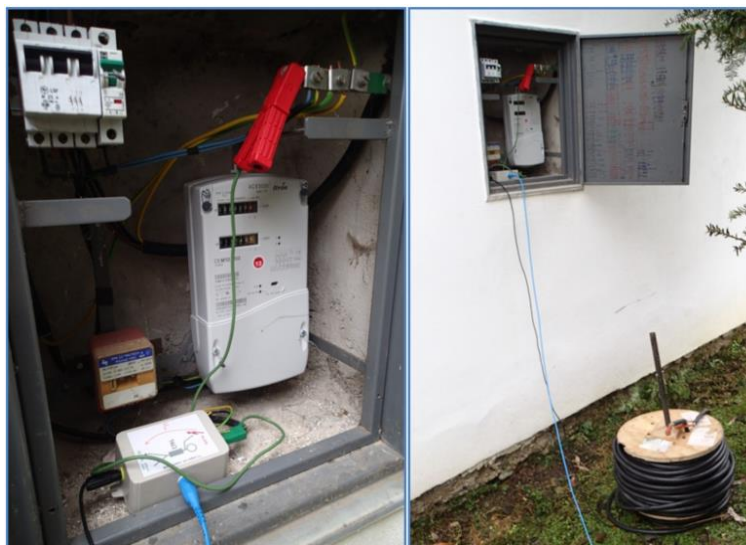


Obr. 9-8 Průběh efektivních hodnot napětí navýšení potenciálu postižené DTS U_E a zaznamenaného dotykového napětí U_T a krokového napětí U_K

Z časové závislosti lze vidět počátek přechodové děje (zemního spojení) v čase $t_0=0$ s. V časech $t_1=0,9$ s a $t_2=7,5$ s dojde k připnutí pomocného odporníku, poté dojde k ustálení přechodového děje. Ukončení zemního spojení v místě poruchy nastalo v čase $t_3=14,3$ s. Naměřené hodnoty pro oba ustálené stavy (ZS a ZS+R) jsou vyznačeny v Tab. 9-5.

9.1.4.1 Měření dotykového napětí

Dotykové napětí bylo měřeno v blízkosti odběrného místa napájeného z DTS se společnou zemnicí soustavou VN a NN, na kterou bylo připojováno zemní spojení. Konkrétní místo pro měření dotykového napětí je znázorněno na Obr. 9-2. Během všech experimentů bylo měřeno dotykové napětí bez přídavné izolace mezi PEN můstkem v elektroměrovém rozváděči (znázorněn na Obr. 9-2) a elektrodou (noha) o ploše 400 cm^2 zatížená 50 kg vzdálená 1m od zdi rozvaděče. Pro měření dotykového napětí byl uvažován odpor lidského těla $1\text{ k}\Omega$. Vlastní místo měření bylo vzdáleno 20 m od DTS.



Obr. 9-9 Měření dotykového napětí na elektroměrovém rozvaděči v blízkosti postižené DTS

V tomto místě byla při průchodu poruchového zemního proudu $I_E = 12,1$ A naměřena hodnota dotykového napětí $U_{Tsilové} = 12,72$ V. Tato hodnota se při uvažování stejného poruchového zemního proudu výrazně liší od hodnoty naměřené při využití frekvenční metody, kde hodnota dotykového napětí dosahovala hodnoty $U_{Tfrekv.} = 2,304$ V.

9.1.4.2 Měření krokového napětí

Krokové napětí bylo měřeno v místě před rozváděčem DTS, jak je zobrazeno na Obr. 9-10, vzdálenost od armatury DTS ve směru C na střed kroku byla 1,6 m, délka kroku 1 m, velikost elektrody noha byla 200 cm^2 , každá elektroda (noha) byla zatížena 25 kg (25 l kanystr). Pro měření krokového napětí nabyla uvažována přídatná izolace a byl uvažován konstantní odpor lidského těla $1\text{ k}\Omega$.



Obr. 9-10 Měření krokového napětí v blízkosti postižené DTS

V tomto místě byla za stejných podmínek, jako při měření dotykového napětí, naměřena hodnota krokového napětí $U_{Ksilové} = 1,84$ V. Tato hodnota se také liší od hodnoty naměřené při využití frekvenční metody, kde hodnota krokového napětí při uvažování zemního proudu $I_E = 12,1$ A dosahovala hodnoty $U_{Kfrekv.} = 0,774$ V (Tab. 9-3 – bod č. 3).

9.1.5 Porovnání výsledků silového a frekvenčního měření

Pro možnosti porovnání frekvenčního a silového měření byl uvažován jako referenční proud získaný při silovém měření, zemní proud $I_E = 12,1$ A. Byly porovnány hodnoty dotykového napětí, naměřené u elektroměrového rozvaděče, umístěného na nedalekém domu a hodnoty krokového napětí v místě před rozvaděčem DTS ve směru měření C (viz Obr. 9-2). Pro měření dotykového napětí byl uvažován přídatný odpor $1 \text{ k}\Omega$, simulující odpor lidského těla.

Tab. 9-6 Porovnání výsledků silového a frekvenčního měření pro referenční proud 12,1 A

$I_E=12,1$ A	Frekvenční metoda	Silová metoda	Místo měření
Dotykové napětí U_T (V)	2,304	12,72	Rozvaděč na domě
Krokové napětí U_K (V)	0,774	1,84	Stožár DTS - Směr C

Jak lze vidět v Tab. 9-6, mezi měřeními pomocí frekvenční a silové metody vznikla velká odchylka. Určitý vliv mohla mít rozdílná hodnota vodivosti půdy v době měření (při silovém měření oblačnost se srážkami, při frekvenčním měření beze srážek), především však může být velká odchylka připisována menší funkčnosti frekvenční metody, oproti metodě silové, která je pro měření uvažována jako správná a tudíž referenční. Mezi pravděpodobné příčiny problému frekvenční metody může patřit nízká velikost generovaného testovacího proudu měřicím systémem OMICRON, určitou úroveň rušení vlivem připojení nadzemního vedení a zakopaná vodovodní potrubí či další kovové části, které mohou ovlivnit a zkreslovat výsledné naměřené hodnoty. Úroveň ustáleného dotykového napětí pro oba typy měření dosahuje nižších hodnot než normou stanovená hodnota ustáleného dotykového napětí $U_{TP} = 75$ V pro dobu trvání poruchy delší 5 s. Těmto požadavkům testovaná zemnicí soustava z hlediska bezpečnosti vyhovuje.

9.2 Měření zemnicí soustavy úsekového odpínače v obci Čikov

V další praktické části diplomové práce bylo provedeno frekvenční měření zemnicí soustavy betonového sloupu s úsekovým odpínačem pro připojení odběratelské trafostanice. Tento podpěrný bod byl v srpnu 2016 kompletně rekonstruován, včetně dvou zemnicích kruhů. Kapacitní proud I_C ve vybrané oblasti distribuční soustavy dosahuje 85 A.

Měření probíhalo dne 12. dubna 2017 v obci Čikov (okres Třebíč) za mírné oblačnosti, beze srážek. Měřicí systém CPC 100 a jeho vazební jednotka CP CU1 byly zapojeny dle schématu zapojení na *Obr. 4-7* Schéma měření zemnicí soustavy DTS pomocí metody potenciálového spádu [11] a umístěny poblíž testovaného betonového sloupu. Celý měřicí systém byl napájen z nedalekého zemědělského družstva. Testovaná zemnicí soustava betonového sloupu s úsekovým odpínačem (ÚO) a rozmístění testovacích elektrod a měřicího systému OMICRON, je zobrazen na *Obr. 9-11*.



Obr. 9-11 Rozmístění testovacích elektrod a měřicího přístroje (Zdroj: www.mapy.cz)

Celkově byly provedeny 4 typy měření:

- měření zemního odporu
- měření rozložení potenciálu
- měření rezistivity půdy
- měření dotykového a krokového napětí

9.2.1 Měření zemního odporu

Při tomto měření probíhá injektáž proudu přes proudovou elektrodu propojenou se zemnicí soustavou pomocí silového kabelu CYKY 5x6 mm². Proudový výstup z měřicího systému je připojený k zemnicí soustavě DTS na zemnicí pásku. Při jednotlivých krocích měření se postupně umísťují napěťové elektrody až do vzdálenosti 40 m ve směru B, naznačeném na *Obr. 9-14* od měřeného betonového sloupu s úsekovým odpínačem. Umísťování elektrod ve

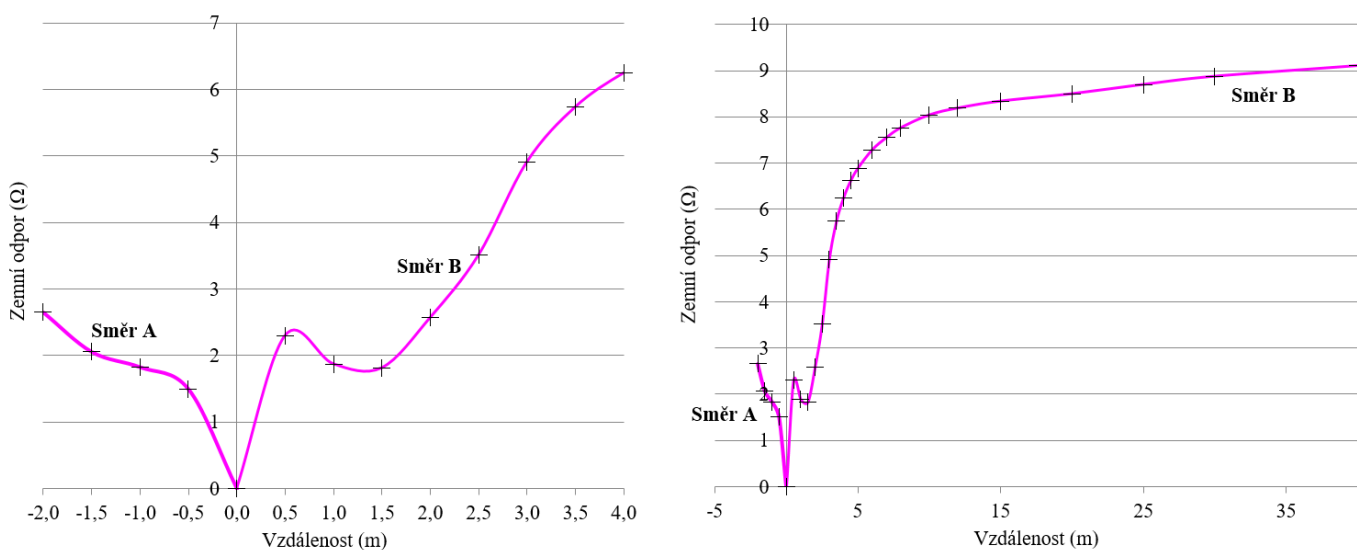
směru B je pod úhlem 90° k průchodu proudu a v každém kroku se zaznamenává naměřená hodnota zemního odporu, která je vyjádřena v závislosti na vzdálenosti.

Při tomto měření měřicí systém zaznamenává hodnotu zemní impedance. Avšak její imaginární část dosahuje ve srovnání s reálnou částí (zemním odporem), velmi nízké úrovně a pro následující potřeby bude využíván pouze zemní odpor R_E .

Maximální hodnota zemního odporu ve vzdálenosti 40 m od zemnicí pásky ve směru B:

- $R_{E_měř.} = 9,102 \Omega$.

Grafické závislosti změny naměřeného zemního odporu, závislého na vzdálenosti od měřeného betonového sloupu s úsekovým odpínačem, jsou zobrazeny na Obr. 9-12. Z těchto závislostí lze pozorovat, že s rostoucí vzdáleností, roste zemní odpor až do maximální hodnoty, kde se ustálí a dál neroste.



Obr. 9-12 Grafická závislost zemního odporu v okolí zemnicích kruhů (nalevo) a zemního odporu (napravo) na vzdálenosti od betonového sloupu s úsekovým odpínačem

V některých případech výsledky měření vykazují náhlá zvýšení či snížení potenciálu a tedy i měřeného zemního odporu. Tyto změny jsou způsobeny zejména výskytem kovových předmětů v zemi, v našem případě umístění zemnicí pásky, které ovlivňují toto měření. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce pro měření zemního odporu, obsažené v příloze této práce.

9.2.2 Porovnání výsledků měření a simulace zemního odporu

V Tab. 9-7 jsou vyznačeny výsledné hodnoty zemního odporu, získané při měření, simulaci, výpočtu dle empirických vztahů uvedených v TNS 00 4910 [19] a hodnota zemního odporu, který byl vypočten při návrhu dané zemnicí soustavy.

Tab. 9-7 Výsledné hodnoty zemního odporu

Zemní odpor R_E (Ω)				
Měření	Simulace	Výpočet pro $\rho_{E,min}$, $\rho_{E,min}$		Návrh
		minimální	maximální	
9,102	9,319	9,701	16,402	11

Výsledný odpor simulace byl vypočten pomocí navýšení potenciálu země U_E a residuálního zemního proudu I_{RES} . Výpočet zemního odporu pomocí empirických vztahů vycházel z rovnic popsanych v [19]. Zde je důležité brát v potaz fakt, že rezistivita půdy v okolí testovaného zemniče nemusí odpovídat rezistivitě půdy, kterou byl zemnič zpětně zasypán (můžou se objevit příměsy šterku atd). Tento fakt může ovlivnit rozdíly potenciálů. Tyto rozdíly můžou být daleko větší a hodnoty zemního odporu při výpočtu a návrhu se mohou s naměřenými výsledky lišit. Z těchto důvodů byl zaveden výpočet odporu pro minimální a maximální naměřenou hodnotu rezistivity v okolí testovaného zemniče a v Tab. 9-7 lze vidět jeho rozsah. Hodnota zemního odporu vypočtená při návrhu byla získána od provozovatele distribuční soustavy.

Měřením bylo také zjištěno, že hodnota zemního odporu získaná měření i simulací dosahuje nižších hodnot než hodnota zemního odporu vypočtená při návrhu. Z tohoto hlediska je tato zemnicí soustava považována za vyhovující.

9.2.3 Měření rozložení potenciálu

Jak již bylo zmíněno u 1. měření v praxi, mezi nejdůležitější měření zemnicích soustav patří měření rozložení potenciálu. Pomocí těchto závislostí lze určit místo největšího poklesu či nárůstu potenciálu a lze tak určit pravděpodobné umístění a rozsah zemnicí soustavy.

Výpočet rozložení potenciálu povrchu země:

$$U_E = (R_{E,MAX} - R_{E,M}) \cdot I_{RES} \quad (9.4)$$

kde	U_E	rozložení potenciálu povrchu země (V)
	$R_{E,MAX}$	maximální impedance zemnicí soustavy (= 9,102 Ω)
	$R_{E,M}$	zemní odpor, naměřený měřícím systémem v určité vzdálenosti od betonového sloupu s úsekovým odpínačem (Ω)
	I_{RES}	zbytkový (reziduální) zemní proud (= 8,5 A)

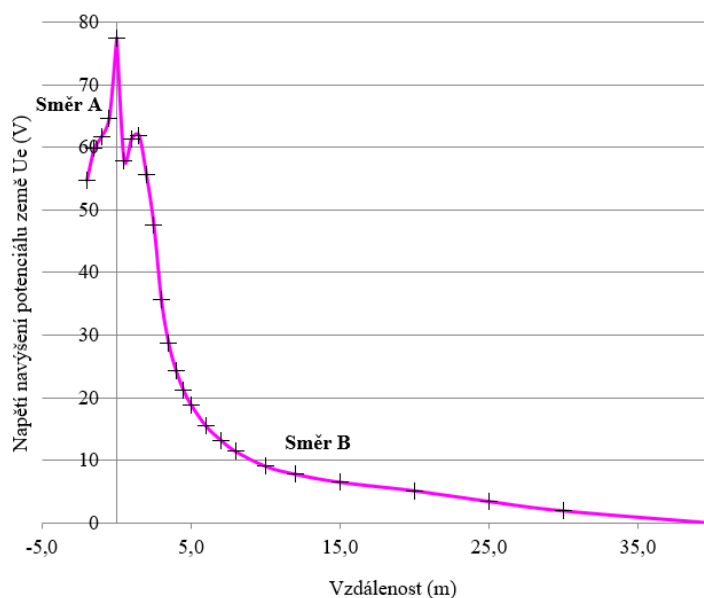
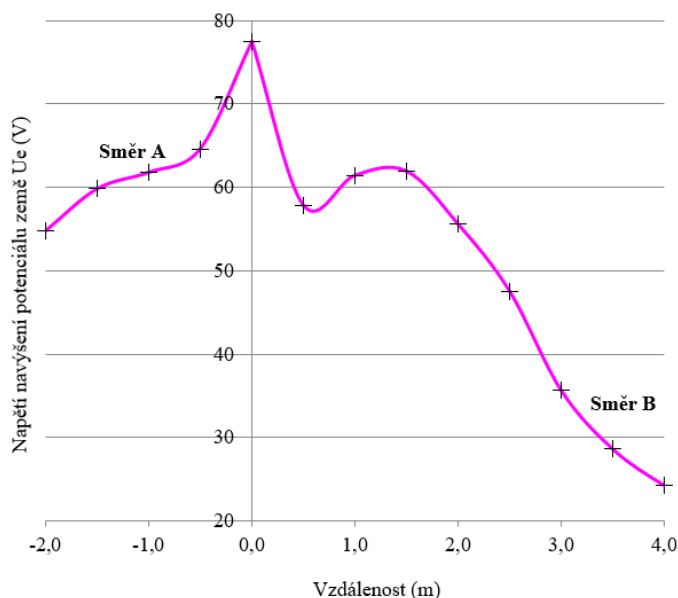
Výpočet rozložení potenciálu povrchu země ve směru A ve vzdálenosti 2 m od místa měření:

$$U_{E,A2m} = (9,102 - 2,654) \cdot 8,5 = 54,85 \text{ V}$$

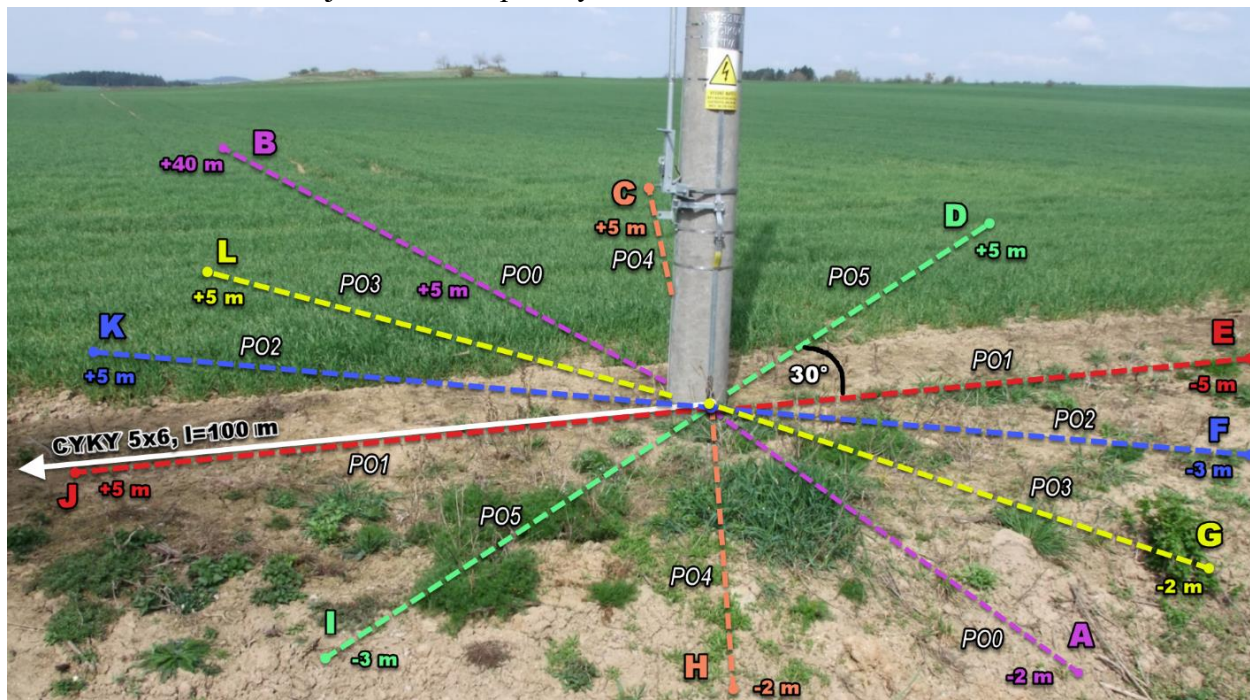
Výpočet rozložení potenciálu povrchu země ve směru B ve vzdálenosti 2 m od místa měření:

$$U_{E,B2m} = (9,102 - 2,577) \cdot 8,5 = 55,57 \text{ V}$$

Mírná odchylka mezi naměřenými hodnotami ve stejné napěťové přímce (PO0) pro směry A a B, může být způsobena odlišnou rezistivitou půdy v těchto místech a umístěním potenciálové elektrody do blízkosti zemnicích kruhů.

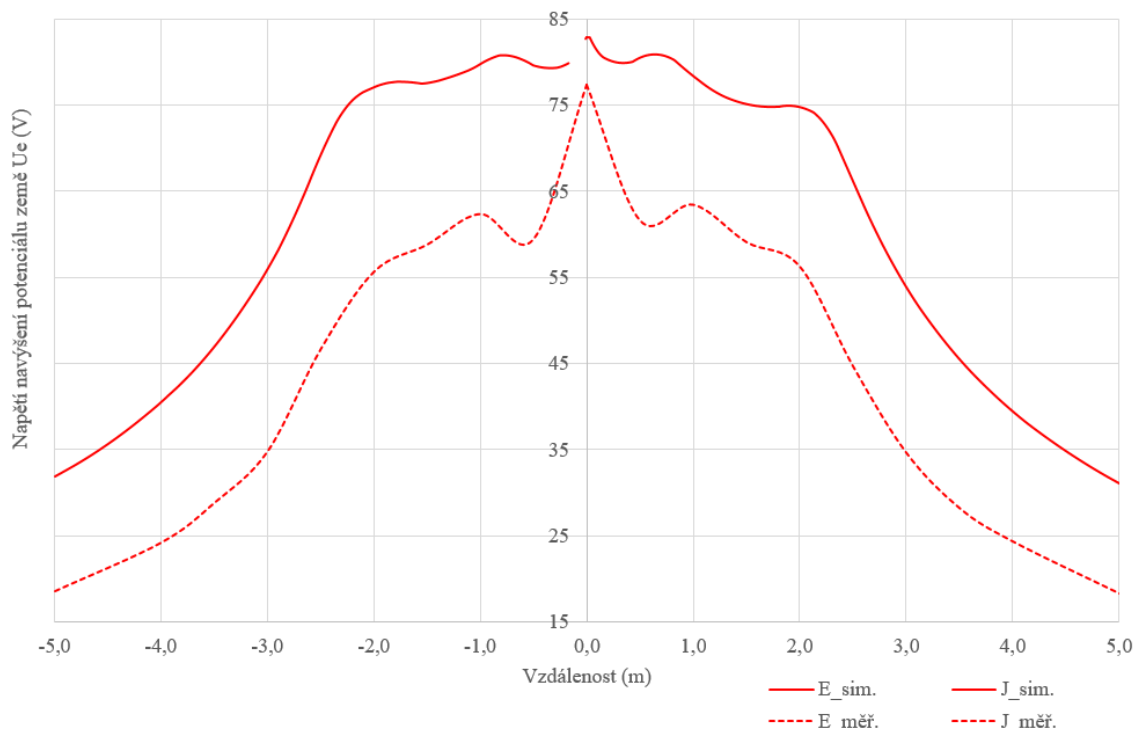


Obr. 9-13 Rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemnicích kruhů (nalevo) a celkové rozložení potenciálu (napravo) v závislosti na vzdálenosti od místa měření, pro $I_{RES} = 8,5$ A. Pro lepší názornost rozložení potenciálu v okolí zemniče bylo provedeno měření v celkem 6ti přímkách (PO0-PO5), a tedy ve 12ti směrech (A-L). Grafické závislosti pro zbylé směry naznačené na Obr. 9-14, jsou součástí přílohy B.



Obr. 9-14 Naznačení směrů umístění napěťových elektrod pro měření zemního odporu a rozložení potenciálu země

Mezi hlavní výhody vytvoření numerického modelu testované zemnicí soustavy patří možnost porovnání výsledků simulace s naměřenými hodnotami při měření. Na Obr. 9-15 lze vidět vidět grafickou závislost napětí navýšení potenciálu země U_E na vzdálenosti od podpěrného bodu pro napěťovou přímkou PO1 (směry E a J). Plnou čarou je vyznačena grafická závislost výsledků simulace v programu ANSYS, čárkovanou čarou grafická závislost z naměřených výsledků. Pro tyto charakteristiky byly uvažovány reálné rozměry zemnicí soustavy a dvouvrstvý model půdy o parametrech uvedených na Obr. 8-2.



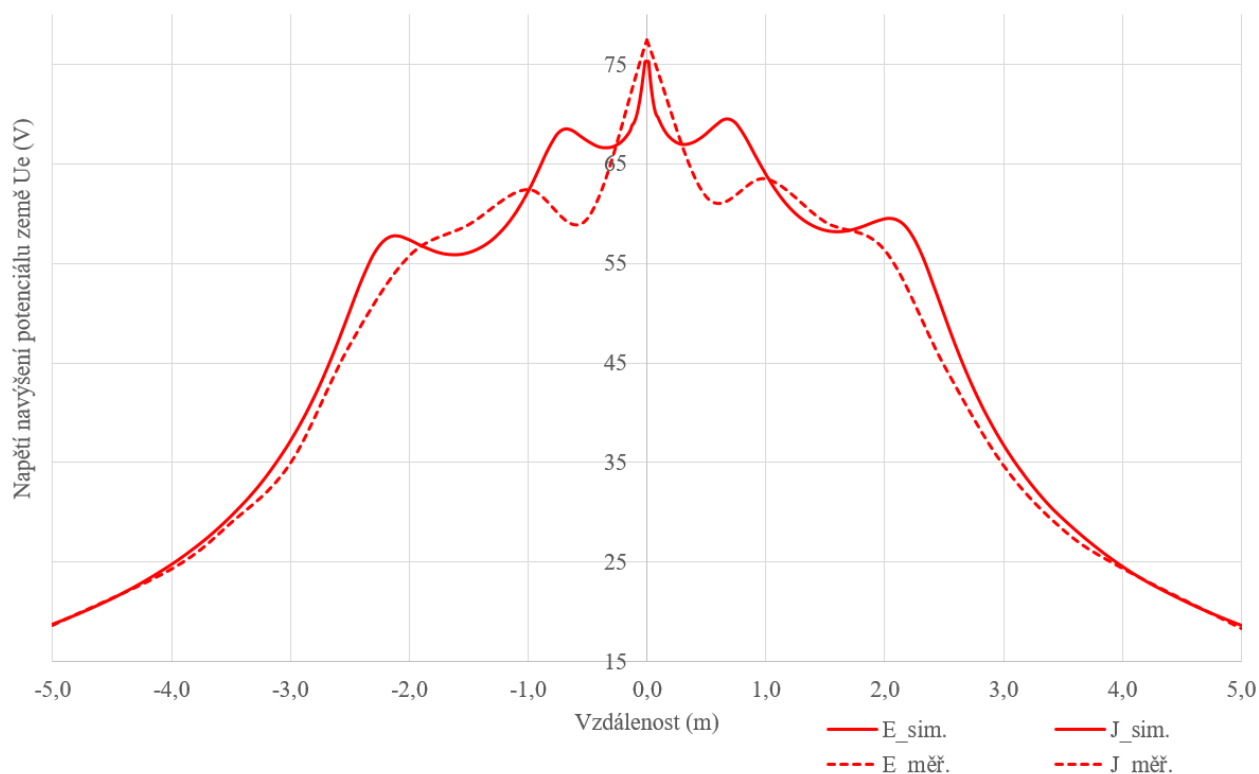
Obr. 9-15 Graf simulace a měření rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemnicích kruhů v přímce POI pro reálný numerický model

Odchylka mezi těmito závislostmi je způsobena především rozdílnou homogenitou půdy. Numerický model uvažuje s homogenitou půdy 100 %, kdežto skutečná hodnota je výrazně menší a je ovlivněna především nestálým půdním podložím, které může obsahovat písek, kameny apod.

U naměřené grafické závislosti lze vidět velký potenciálový spád, ke kterému došlo u podpěrného bodu. Ten může být dán daleko větší rezistivitou horní vrstvy půdy, než která byla změřena. Z tohoto důvodu byla využita určitá korekce některých vstupních parametrů numerického modelu - zejména rezistivity a hloubky obou půdních vrstev. Rozměry zemnicí soustavy zůstaly stejné. Přibližná shoda výsledků měření a simulace, byla nalezena pro tyto parametry:

- tloušťka vrchní vrstvy půdy: $h = 0,5$ m
- rezistivita vrchní vrstvy půdy: $\rho_1 = 71 \Omega\text{m}$
- rezistivita spodní vrstvy půdy: $\rho_2 = 125 \Omega\text{m}$

Výsledné grafické závislosti pro tyto parametry jsou zobrazeny na Obr. 9-16.



Obr. 9-16 Graf simulace a měření rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemnicích kruhů v přímce PO1 pro upravený numerický model

9.2.4 Měření rezistivity půdy

Jak již bylo zmíněno v teoretické části práce, v kapitole 3.1.3, pro měření rezistivity půdy v praxi byly využity 2 měřicí přístroje: METRA PU 193 a OMICRON CPC 100. Dva měřicí přístroje byly využity z důvodu ověření přesnosti měření, zjištění případných výchylek a získání co nejpřesnějších výsledků. Hodnoty byly změřeny pro různé oblasti v okolí testované zemnicí soustavy pro hloubky 1 a 2 m (Tab. 9-8) a pro hloubky 3, 5 a 10 m (Tab. 9-9). Jak lze pozorovat, výsledky získané pomocí těchto měřicích přístrojů, jsou pro stejné body téměř totožné a odchylka je zanedbatelná. Byl zde uvažován také vliv kolísání rezistivity v závislosti na ročním období. Naměřené hodnoty rezistivity byly vynásobeny činitelem K , který byl odečten z charakteristiky pro suché období na Obr. 3-1. Pro měsíc duben byl odečten koeficient $K = 1,1$. Naměřené hodnoty byly využity pro vytvoření dvouvrstvého modelu půdy numerického modelu testované zemnicí soustavy, viz kapitolu 8 Numerický model zemnicí soustav.

Tab. 9-8 Tabulka naměřených hodnot z měření rezistivity půdy pro hloubky 1 a 2 m

Bod č.	Poznámka	Rezistivita naměřená pomocí PU193		Rezistivita přepočítaná z naměřeného odporu pomocí CPC 100			
		v hloubce d=1 m		v hloubce d=2 m		v hloubce d=2 m	
		ρ (Ωm)	ρ (Ωm)	R (Ω)	ρ (Ωm)	R (Ω)	ρ (Ωm)
1		95,8	69,3	-		-	-
2		82,5	68,2	13,108	82,360	5,460	68,612
3		74,3	65,32	11,838	74,3803	5,233	65,760
4		-	-	10,396	65,320	4,308	54,138
5	pole	-	-	10,845	68,1411	5,301	66,614

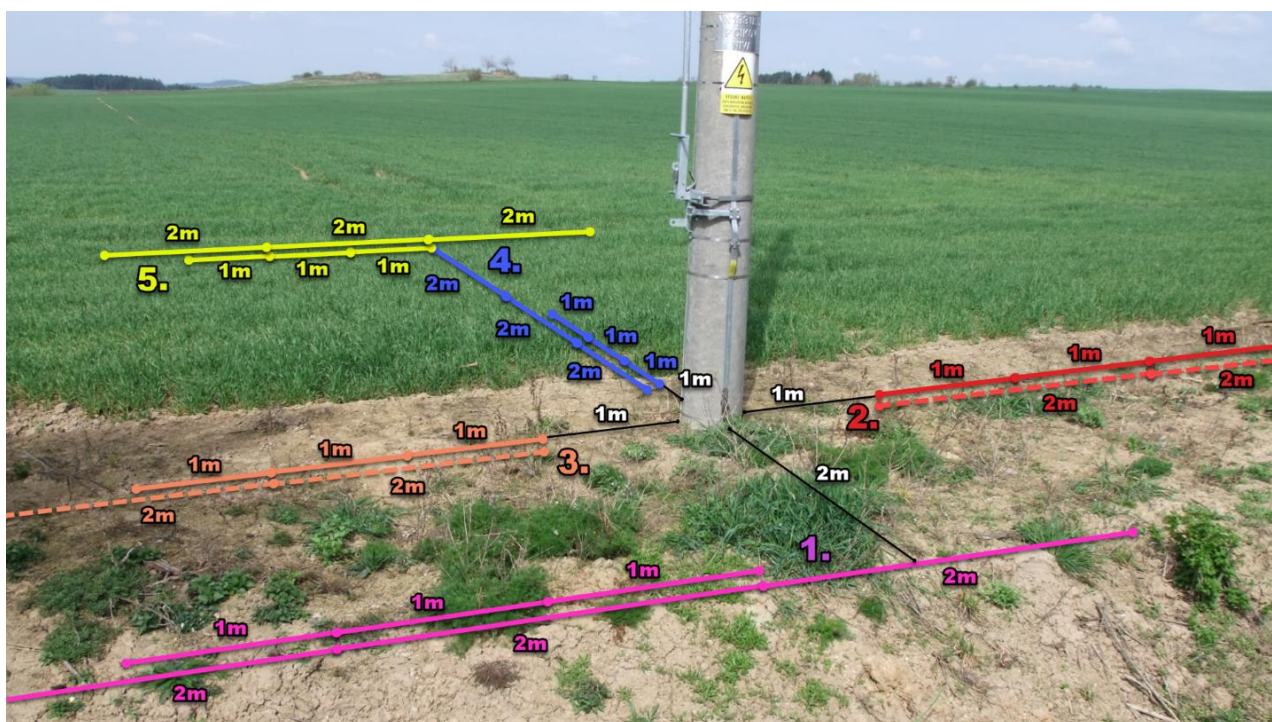
Střední hodnota rezistivity půdy při měření:

- v hloubce 1 m: **77,21 Ωm**
- v hloubce 2 m: **64,72 Ωm**

Tab. 9-9 Tabulka naměřených hodnot z měření rezistivity půdy pro hloubky 3, 5 a 10 m

Bod č.	Poznámka	Rezistivita naměřená pomocí PU193		
		v hloubce d=3m	v hloubce d=5m	v hloubce d=10m
		ρ (Ωm)	ρ (Ωm)	ρ (Ωm)
2	od sloupu doprava	108,8	53,3	74,1
3	od sloupu doleva	105,7		
5	pole, směr B	-	-	128,5

Z výstupních hodnot lze pozorovat, že se jednotlivá místa vlivem rozdílných půdních vrstev liší. V místech podpěrného bodu, kde došlo k realizaci zemnicích kruhů a povrch země byl obnažen a následně zpětně dosypán, dosahuje hodnota rezistivity půdy pro hloubku 1 m vyšších hodnot než v případě bodů, vyskytujících se např. na poli. Zde se vyskytují místa (body č. 4 a 5) s nejlepšími půdními podmínkami, kdy rezistivita dosahuje hodnot okolo 65 Ωm , což odpovídá poměrně kvalitní zemině s dobrou vodivostí. Na Obr. 9-17 jsou vyznačeny místa pro měření rezistivity půdy v okolí testovaného zemniče pro hloubky 1 a 2 m.



Obr. 9-17 Zaznačená místa pro měření rezistivity půdy v okolí testovaného zemniče

9.2.5 Měření dotykového a krokového napětí

Měření dotykového a krokového napětí bylo provedeno jako u 1. měření za pomoci měřicího systému CPC 100, jeho vazební jednotky CP CU1 a frekvenčně selektivního voltmetru CP AL1.

Měření probíhalo v okolí podpěrného bodu s úsekovým odpínačem v místech, kde by mohlo dojít k současnému dotyku kovové části, kterou zde představuje především ovládací táhlo úsekového odpínače. Měření probíhalo na frekvencích 30 a 70 Hz.

Výsledky byly opět za pomoci speciálních šablon v programu CPC Excel File Loader přepočteny na hodnoty skutečného dotykového napětí, které by se mohlo objevit na testovaných místech. Toto napětí se určí ze vztahu (5.1).

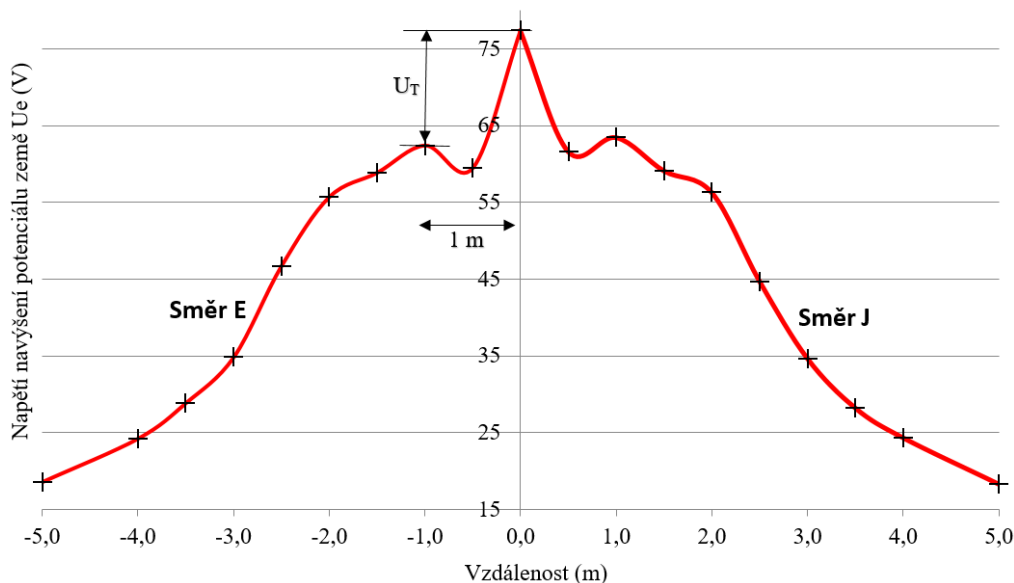
Tab. 9-10 Měření dotykového napětí v místě táhla úsekového odpínače pro $I_{RES}=8,5$ A

Frekvence, ve které probíhalo měření:		30 Hz	70 Hz	Poznámka:
Proud nastavený měřicím systémem (A):		100	100	
Proud měřený na výstupu CP CU1 (A):		2,5	2,5	
Zbytkový (residuální) zemní proud (A):		I_{RES}		
		8,5		
Umístění	U_{V-metr} (V):		Skutečné dotykové napětí $U_{T\text{ měř.}}$ (V)	
	30,0 Hz	70,0 Hz		
Bod č. 1	0,656	1,19	3,138	Táhlo úsekového odpínače

Příklad výpočtu dotykového napětí mezi místem měření (táhlo ÚO) a elektrodou (noha) vzdálenou 1 m ve směru E, v bodě č. 1:

$$U_{T\text{ měř.}} = \frac{U_{T,30\text{Hz}} + U_{T,70\text{Hz}}}{2} \cdot \frac{I_E}{I_M \cdot r} = \frac{0,33 + 0,59}{2} \cdot \frac{35}{2,5 \cdot 1} = 3,138 \text{ V} \quad (5.1)$$

Hodnota největšího předpokládaného poruchového proudu I_E , který může zemničem protékat, závisí především na typu a rozsahu sítě, ve které se distribuční trafostanice nebo podpěrný bod s úsekovým odpínačem nachází. Jedná se o kompenzovanou síť 22 kV, kde se pro snížení zemního proudu připojuje do nulového bodu transformátoru tzv. zhášecí tlumivka (Petersenova cívka). V zásadě se kompenzovaná síť při spojení jedné fáze se zemí chová jako síť izolovaná, ale kapacitní poruchový proud je kompenzován a místem poruchy, tedy i postiženou fází protéká jen velmi malý zbytkový (reziduální) proud I_{RES} , což přináší také problematické zjišťování místa zemního spojení. Kompenzace kapacitní složky zemního proudu má však i své výhody a to díky nižším nákladům na uzemnění, které může být dimenzováno pouze na zbytkový zemní proud I_{RES} . Pokud není známa hodnota tohoto zbytkového zemního proudu, norma [3] tuto hodnotu udává jako 10% kapacitního proudu zemního spojení I_C . Kapacitní proud v námi vybrané distribuční soustavě dosahuje 85 A, zemní residuální proud I_{RES} se poté za těchto předpokladů rovná 8,5 A.



Obr. 9-18 Určení dotykového napětí z grafu rozložení potenciálu země

Dotykové napětí může být určeno také z grafické závislosti rozložení potenciálu země v okolí testované zemnicí soustavy, viz Obr. 5-2 Znázornění dotykového a krokového napětí v závislosti na potenciálu země [3]. Jak již bylo zmíněno, dotykové napětí bylo měřeno ve vzdálenosti 1 m od táhla úsekového odpínače ve směru E. Ze znalosti definice dotykového napětí lze vyjádřit dotykové napětí jako rozdíl dvou různých míst s rozdílným potenciálem.

$$U_{T_vyp.} = U_{E_0m} - U_{E_1m} \quad (9.2)$$

kde $U_{T_vyp.}$ vypočtená hodnota dotykového napětí (V)

U_{E_0m}, U_{E_1m} naměřené hodnoty nárůstu potenciálu země v určité vzdálenosti od podpěrného bodu (V)

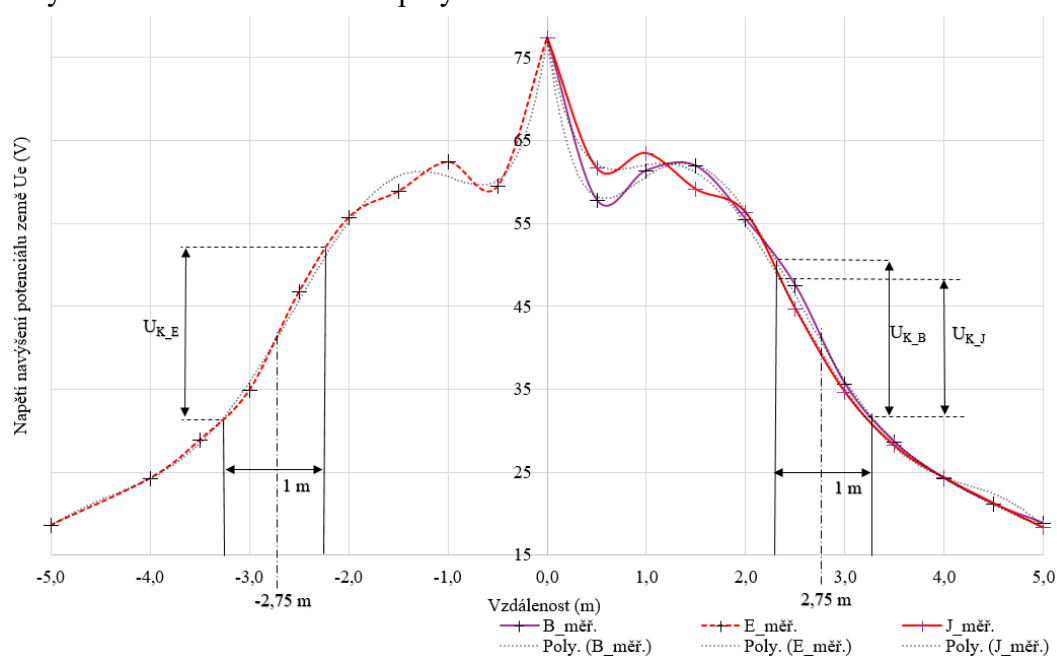
$$U_{T_vyp.} = 77,41 - 62,4 = 15,01 \text{ V} \quad (9.2)$$

Jak lze vidět, rozdíl mezi naměřeným dotykovým napětím, přepočteným pro residuální proud $I_{RES} = 8,5 \text{ A}$ a dotykovým napětím, vypočteným pomocí rozdílu potenciálu z grafické závislosti je značný. Tato odchylka může být způsobena zejména rozdílnou kontaktní plochou při frekvenčním měření dotykového napětí, kterou představují dva kanystry simulující lidská chodidla. Při určování dotykového napětí z grafu rozložení potenciálu země tento problém nenastává, jelikož se při tomto měření využívá pro měření jednotlivých hodnot napěťové elektrody, které se zasunují do země, do hloubky 20 cm. Mírná odchylka také vzniká při prokládání grafu rozložení potenciálu a následném odečítání. Úroveň ustáleného dotykového napětí pro hodnotu získanou měřením a hodnotu odečtenou z grafu rozložení potenciálu země dosahuje nižších hodnot než normou stanovená hodnota ustáleného dotykového napětí $U_{TP} = 75 \text{ V}$ pro dobu trvání poruchy delší než 5 s. Těmto požadavkům testovaná zemnicí soustava z hlediska bezpečnosti vyhovuje.

Krokové napětí bylo měřeno ve více směrech před betonovým sloupem, jak je zobrazeno na Obr. 9-14. Pro měření bylo využito stejného postupu, jako u 1. měření v praxi. Vzdálenosti od zemnicí pásky na střed kroku byly 1,25 m a 2,75 m, délka kroku 1 m. Tyto vzdálenosti byly zvoleny s ohledem na fakt, že k největšímu krokovému napětí dochází na okraji zemnicích kruhů.

Frekvence, ve které probíhalo měření:		30 Hz	70 Hz	Poznámka:
Proud nastavený měřicím systémem (A):		100	100	
Proud měřený na výstupu CP CU1 (A):		2,5	2,5	
Zbytkový (residuální) zemní proud (A):		I_{RES}		
		8,5		
Umístění	U_{V-metr} (V):		Skutečné krokové napětí U_K (V)	
	30,0 Hz	70,0 Hz		
Bod č. 1	0,026	0,056	0,139	1,25 m od p.b. ve směru B
Bod č. 2	0,06	1,115	1,998	2,75 m od p.b. ve směru B
Bod č. 3	0,058	0,112	0,289	1,25 m od p.b. ve směru E
Bod č. 4	0,24	0,45	1,173	2,75 m od p.b. ve směru E
Bod č. 5	0,196	0,369	0,961	1,25 m od p.b. ve směru J
Bod č. 6	0,296	0,575	1,481	2,75 m od p.b. ve směru J

Také krokové napětí může být určeno z grafické závislosti rozložení potenciálu země v okolí testované zemnicí soustavy, viz Obr. 9-19. Hodnoty krokového napětí byly pro 3 směry (B, E, J) zjištěny pomocí proložení grafických závislosti polynomem 6. řádu a určeny dosazením požadovaných vzdáleností do rovnice polynomu.



Obr. 9-19 Určení krokového napětí z grafu rozložení potenciálu země

- rovnice polynomu získaná v programu Excell

- $x = -3,25$ m

$$U_{E_{B3,25m}} = 0,214 \cdot (-3,25)^6 - 3,8274 \cdot (-3,25)^5 + 26,832 \cdot (-3,25)^4 - 89,019 \cdot (-3,25)^3 + 136,36 \cdot (-3,25)^2 - 87,196 \cdot (-3,25) + 77,325 = 32,094 \text{ V}$$

- $x = -2,25$ m

$$U_{E_{B2,25m}} = 0,214 \cdot (-2,25)^6 - 3,8274 \cdot (-2,25)^5 + 26,832 \cdot (-2,25)^4 - 89,019 \cdot (-2,25)^3 + 136,36 \cdot (-2,25)^2 - 87,196 \cdot (-2,25) + 77,325 = 51,741 \text{ V}$$

Výpočet krokového napětí ve vzdálenosti 2,75 m od měřené zemnicí soustavy ve směru B:

$$U_{K_{Bvyp.}} = U_{E_{B2,25m}} - U_{E_{B3,25m}} = 51,741 - 32,094 = 19,646 \text{ V} \quad (9.3)$$

Tab. 9-11 Hodnoty krokového napětí určené z grafu rozložení potenciálu země

	x (m)	$U_{E,B}$ (V)	$U_{K,Bvyp.}$ (V)
Směr B	2,25	51,741	19,646
	3,25	32,094	
Směr E	2,25	50,793	18,952
	3,25	31,841	
Směr J	2,25	50,148	19,156
	3,25	30,992	

V Tab. 9-11 jsou zaznamenány hodnoty krokového napětí určené z grafu rozložení potenciálu země pro 3 hlavní směry v okolí betonového sloupu s úsekovým odpínačem. Opět lze vidět velkou odchylku mezi naměřeným krokovým napětím a krokovým napětím odečteným z grafu rozložení potenciálu. Tato odchylka vznikla ze stejných důvodů, jako odchylka při měření dotykového napětí.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce pojednává o problematice měření zemnicích soustav VN/NN sítí, které v praxi představují především zemnicí soustavy distribučních trafostanic a úsekových odpínačů VN. V teoretické části práce jsou shrnuty metody měření důležitých parametrů zemnicích soustav, mezi které patří zemní odpor, rozložení potenciálu povrchu země, rezistivita půdy, dotykové a krokové napětí.

V praktické části práce byl vytvořen numerický model reálné zemnicí soustavy úsekového odpínače v programu ANSYS Maxwell, který byl následně porovnán s měřením dané zemnicí soustavy. Tento model byl vytvořen na základě skutečného provedení dvou ekvipotenciálních kruhů a naměřených hodnot rezistivity půdy v okolí tohoto zemniče. V další části byly provedeny dvě série měření zemnicích soustav v praxi.

První měření probíhalo v obci Klenov pro zemnicí soustavu distribuční trafostanice. Pro možnost porovnání a ověření výsledků byly provedeny dva typy měření. Nejprve se jednalo o frekvenční měření, které využívá metody potenciálového spádu a injektáže testovacího proudu pomocí měřicího systému CPC 100 a CP CU1 od firmy OMICRON. Poté bylo při experimentálním ověření automatiky přizemnění postižené fáze v distribuční soustavě 22 kV, provedeno silové měření. Toto měření probíhalo při simulaci kovového zemního spojení. Pro možnost porovnání frekvenčního a silového měření byl uvažován referenční proud, získaný při silovém měření, zemní proud $I_E = 12,1$ A. Byly porovnány hodnoty dotykového napětí, naměřené u elektroměrového rozvaděče, umístěného na nedalekém domu a hodnoty krokového napětí v místech před rozvaděčem DTS ve směru měření C. Pro měření dotykového napětí byl uvažován přídavný odpor $1\text{ k}\Omega$, simulující odpor lidského těla. Při měření dotykových napětí ($U_{T\text{frekv.}} = 2,304\text{ V}$, $U_{T\text{silové}} = 12,72\text{ V}$) a krokových napětí ($U_{K\text{frekv.}} = 2,304\text{ V}$, $U_{K\text{silové}} = 1,84\text{ V}$) vznikla velká odchylka. Tato odchylka s největší pravděpodobností prokazuje malou přesnost frekvenční metody oproti metodě silové. Mezi pravděpodobné příčiny menší přesnosti frekvenční metody může patřit nízká velikost testovacího proudu generovaného měřicím systémem OMICRON, určitou úroveň rušení vlivem připojeného nadzemního vedení či výskytem kovových částí v zemi, které mohli ovlivnit a zkreslit výsledné naměřené hodnoty. Úroveň ustáleného dotykového napětí pro oba typy měření dosahuje nižších hodnot než normou stanovená ustálená hodnota dotykového napětí $U_{TP} = 75\text{ V}$ pro dobu trvání poruchy delší než 5 s. Z toho hlediska testovaná soustava vyhovuje.

Druhé měření probíhalo v obci Čikov pro zemnicí soustavu úsekového odpínače, umístěného na vedení 22 kV. Tato zemnicí soustava byla podkladem pro vytvoření numerického modelu, se kterým byly následně naměřené výsledky porovnány. Důležitým parametrem, který sloužil k porovnání výsledků měření, simulace a empirického výpočtu, je zemní odpor. Naměřený odpor dosahoval hodnoty $R_{E, \text{měř}} = 9,102\ \Omega$. Výsledný odpor simulace byl vypočten pomocí simulovaného navýšení potenciálu země U_E a residuálního zemního proudu I_{RES} . Jeho hodnota dosahovala $R_{E, \text{sim}} = 9,319\ \Omega$. Na rozdíl od numerického modelu, kde je uvažován dvouvrstvý model půdy, empirický výpočet uvažuje pouze jednovrstvý model, a tak byl stanoven rozsah rezistivit ($\varphi_{E, \text{min}} = 76\ \Omega\text{m}$, $\varphi_{E, \text{max}} = 128,5\ \Omega\text{m}$), pro který byl vypočten rozsah výsledných odporů ($R_{E, \text{min}} = 9,701\ \Omega$, $R_{E, \text{max}} = 16,402\ \Omega$). Při porovnání těchto hodnot lze vidět, že odchylka mezi naměřenou, simulovanou a vypočtenou hodnotou zemního odporu dosahuje poměrně nízké úrovně. Bylo také zjištěno, že hodnoty zemního odporu dosahují nižších hodnot než hodnota

zemního odporu vypočtená při návrhu zemnicí soustavy $R_{E_návrh} = 11 \Omega$. Z tohoto hlediska lze tuto zemnicí soustavu považovat za vyhovující.

Dalším důležitým parametrem, který byl změřen a následně porovnán s výsledky simulace, je rozložení potenciálu povrchu země. V prvním případě byly porovnány naměřené výsledky s reálným numerickým modelem. Při tomto porovnání vznikla mezi těmito závislostmi určitá odchylka, která je způsobena především rozdílnou homogenitou půdy. Numerický model uvažuje s homogenitou půdy 100 %, kdežto skutečná hodnota je výrazně menší a je ovlivněna především nestálým půdním podložím, které může obsahovat písek, šterk apod. U naměřené grafické závislosti lze vidět velký potenciálový spád, ke kterému došlo u podpěrného bodu. Ten může být dán daleko větší rezistivitou horní vrstvy půdy, než která byla ve skutečnosti změřena. Z tohoto důvodu byla využita korekce některých vstupních parametrů numerického modelu, zejména rezistivity a hloubky obou půdních vrstev. Rozměry zemnicí soustavy zůstaly stejné. Jak lze následně vidět, po úpravě tohoto modelu se obě charakteristiky téměř shodují a jsou zobrazeny v kapitole 9.2.3.

U měření zemnicí soustavy v obci Čikov proběhlo také měření dotykového a krokového napětí pomocí frekvenční metody, kdy byly využity speciální kanystry s vodou, simulující lidská chodidla. Měření dotykového napětí probíhalo v místech, kde by mohlo dojít k současnému dotyku kovové části, kterou zde představuje především ovládací táhlo úsekového odpínače. Měření krokového napětí probíhalo na hranicích ekvipotenciálních kruhů zemnicí soustavy, kde hodnoty krokového napětí dosahují nejvyšší úrovně.

Jak lze vidět, rozdíl mezi naměřeným dotykovým napětím, přepočteným pro residuální proud $I_{RES} = 8,5 \text{ A}$ ($U_{T_frekv.} = 3,14 \text{ V}$) a dotykovým napětím, vypočteným pomocí rozdílu potenciálu z grafické závislosti ($U_{T_vyp.} = 15,01 \text{ V}$) je značný a liší se přibližně o pěti násobek. Ještě větší odchylka vznikla při porovnání krokového napětí, přibližně o deseti násobek.

Tato odchylka může být způsobena zejména rozdílnou kontaktní plochou, kterou představují dva kanystry simulující lidská chodidla. Při určování dotykového napětí z grafu rozložení potenciálu země tento problém nenastává, jelikož se při tomto měření využívá zasunutí napěťových elektrod přímo do země. Úroveň ustáleného dotykového napětí pro toto měření dosahuje také nižších hodnot než normou stanovená hodnota ustáleného dotykového napětí $U_{TP} = 75 \text{ V}$ pro dobu trvání poruchy delší než 5 s. Těmto požadavkům tak testovaná zemnicí soustava z hlediska bezpečnosti také vyhovuje.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] - TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [2] - KOČVARA, Antonín. *Uzemňování elektrických zařízení*. Knižnice elektro, svazek 26. Praha: STRO.M, 1995.
- [3] - ČSN EN 50 522. *Uzemňování elektrických instalací nad 1 kV*. Český normalizační institut, Prosinec 2011.
- [4] - SÍTAŘ, Martin. *Měření zemních soustav VN/NN a dotykových napětí v okolí DTS*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.
- [5] - ČSN 33 2000-5-54 ed.2. *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-54: Výběr a stavba elektrických zařízení - Uzemnění, ochranné vodiče a vodiče ochranného pospojování*. Český normalizační institut, 2007.
- [6] - LHOTÁK, Bc. Jiří. *Návrh zemnicího systému pro nízké napětí*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] - ANSI/IEEE STD 81-1983. *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*. 1st. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1984.
- [8] - PNE 33 0000-1, ed.5: *Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě*. ČEZ distribuce, E.ON distribuce, E.ON ČR, PRE distribuce, ČEPS a ZSE, 2011.
- [9] - OMICRON ELECTRONICS GmbH. *CPC 100 Reference Manual*. 2007, 368 s.
- [10] - ŠEVČÍK, Ing. Antonín. *Izolační a zemní odpor: (praktická měření s přístroji METRA BLANSKO a.s.)*. *Bezpečnost práce na elektrických zariadeniach*. 2008, 9.
- [11] - IEEE STD 81-2012. *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York, USA: IEEE Power and Energy Society, 2012.
- [12] - PNE 33 0000-4. *Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny*. 3. vyd. Český normalizační institut, 2011.
- [13] - ČSN 33 3201. *Elektrické instalace nad AC 1 kV*. Český normalizační institut, Listopad 2002, 162 s.
- [14] - ČSN 33 3201. *Elektrické instalace nad AC 1 kV*. Český normalizační institut, 2002.
- [15] - IEEE STD 80-2013. *Guide for safety in AC Substation Grounding*. New York, USA: IEEE Power and Energy Society, 2013
- [16] - BALÁZS, Bc. Ladislav. *Problematika měření malých AC napětí*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [17] - ČSN 33 2000-5-52 ed. 2. *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-52:: Výběr a stavba elektrických zařízení - Elektrická vedení*. Český normalizační institut, 2012.
- [18] - PNE 35 4212 ed. 2. *Úsekové spínače pro venkovní vedení do 45kV, včetně*. Český normalizační institut, 2016.
- [19] - TNS 00 4910.05. *Uzemnění elektrických zařízení Projektování, výstavba a provoz*. Technická norma společnosti E.ON Česká republika, s.r.o., 2016.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Měření Klenov

Příloha B: Měření Čikov

Příloha A: Měření Klenov

Kapacitní proud I_c (A):	350
Zbytkový zemní proud I_{RES} (A):	35
Zemní odpor při frekvenčním měření R_{E_frek} (Ω):	21,102
Zemní odpor při silovém měření R_{E_sil} (Ω):	3,72
Nárůst potenciálu země U_E (V):	130,2

Tabulka naměřených hodnot při frekvenčním měření pro směr A:

Vzdálenost (m)	Pozn.	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	Zk (Ω)	φ_{el} ($^\circ$)	U_k (V/m)	U_E (V)	$U_{E\%}$ (%)	$U_{k\%} * U_E$ (%)
-25		21,10	8,43	22,723	3,72	21,77	-	0,01	100	-
-20		18,28	7,24	19,658	3,22	21,60	3,552	17,43	100	2,68
-18		17,31	6,89	18,633	3,05	21,69	2,970	23,37	100	2,28
-16		16,24	6,51	17,501	2,86	21,85	3,281	29,97	100	2,54
-14		15,01	6,02	16,171	2,65	21,87	3,853	37,61	100	2,93
-12		14,23	5,68	15,317	2,51	21,77	2,473	42,43	100	1,85
-11		13,51	5,39	14,546	2,38	21,74	4,472	46,84	100	3,38
-10		12,89	5,14	13,880	2,27	21,73	3,858	50,64	100	2,92
-9		12,18	4,88	13,120	2,15	21,84	4,405	55,06	100	3,39
-8		11,27	4,48	12,129	1,99	21,67	5,739	60,65	100	4,29
-7		10,35	4,08	11,124	1,82	21,52	5,824	66,35	100	4,37
-6		9,18	3,61	9,861	1,62	21,48	7,322	73,58	100	5,56
-5		7,81	3,03	8,374	1,38	21,24	8,617	82,04	100	6,50
-4		5,31	2,03	5,681	0,94	20,96	15,603	97,47	100	11,85
-3		3,19	1,15	3,389	0,56	19,85	13,278	110,53	100	10,03
-2		2,25	0,78	2,382	0,40	19,01	5,838	116,31	100	4,44
-1		1,00	0,27	1,037	0,18	14,80	7,791	124,01	100	5,92
0		0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	6,011	130,20	100	4,75

Tabulka naměřených hodnot při frekvenčním měření pro směr B:

Vzdálenost (m)	Pozn.	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	Zk (Ω)	φ_{el} ($^\circ$)	U_k (V/m)	U_E (V)	$U_{E\%}$ (%)	$U_{k\%} * U_E$ (%)
0		0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	6,189	130,20	100	4,75
1		0,84	0,30	0,890	0,15	19,55	0,506	125,02	100	0,39
2		1,62	0,54	1,708	0,29	18,39	4,825	120,20	100	3,71
3		2,03	0,71	2,155	0,36	19,35	2,542	117,66	100	1,95
4		4,66	1,81	5,002	0,82	21,26	16,221	101,44	100	12,46
5		6,19	2,45	6,655	1,09	21,56	9,422	92,01	100	7,24
6		7,84	3,12	8,435	1,38	21,73	10,162	81,85	100	7,80
7		9,24	3,66	9,943	1,63	21,62	8,681	73,17	100	6,67
8		10,59	4,19	11,386	1,87	21,58	8,299	64,87	100	6,37
9		11,86	4,73	12,767	2,09	21,75	7,836	57,04	100	6,02
10		12,83	5,18	13,840	2,26	22,00	6,010	51,03	100	4,62
12		14,19	5,78	15,319	2,50	22,18	4,174	42,68	100	3,21
15		16,14	6,53	17,408	2,84	22,02	4,017	30,63	100	3,09
20		18,52	7,42	19,946	3,26	21,83	2,934	15,96	100	2,25
25		20,73	8,21	22,297	3,65	21,61	2,731	2,30	100	2,10

Tabulka naměřených hodnot při frekvenčním měření pro směr C:

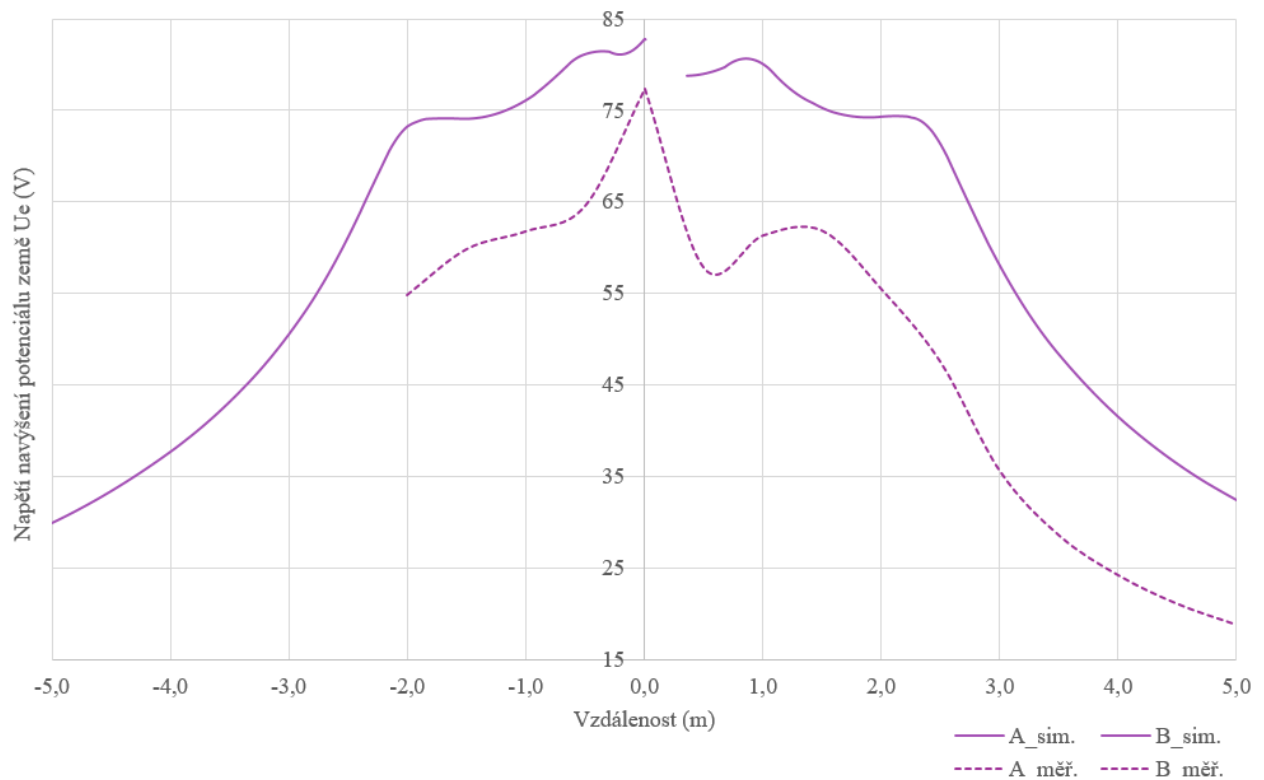
Vzdálenost (m)	Pozn.	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	Zk (Ω)	φ_{el} ($^\circ$)	U_k (V/m)	U_E (V)	$U_{E\%}$ (%)	$U_{k\%} * U_E$ (%)
0		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	130,20	100	0,00
1		1,664	0,5727	1,76	0,843	18,99	29,505	100,70	100	22,66
2		2,707	1,0173	2,891	1,371	20,60	18,487	82,21	100	14,20
3		4,897	1,9266	5,262	2,481	21,48	38,837	43,37	100	29,83
4		6,699	2,6618	7,208	3,393	21,67	31,945	11,43	100	24,53
5		7,343	2,9429	7,911	3,720	21,84	11,428	0,00	100	8,78

Příloha B: Měření Čikov

Tabulka naměřených hodnot při frekvenčním měření pro napětovou přímku PO0 (směry A a B)

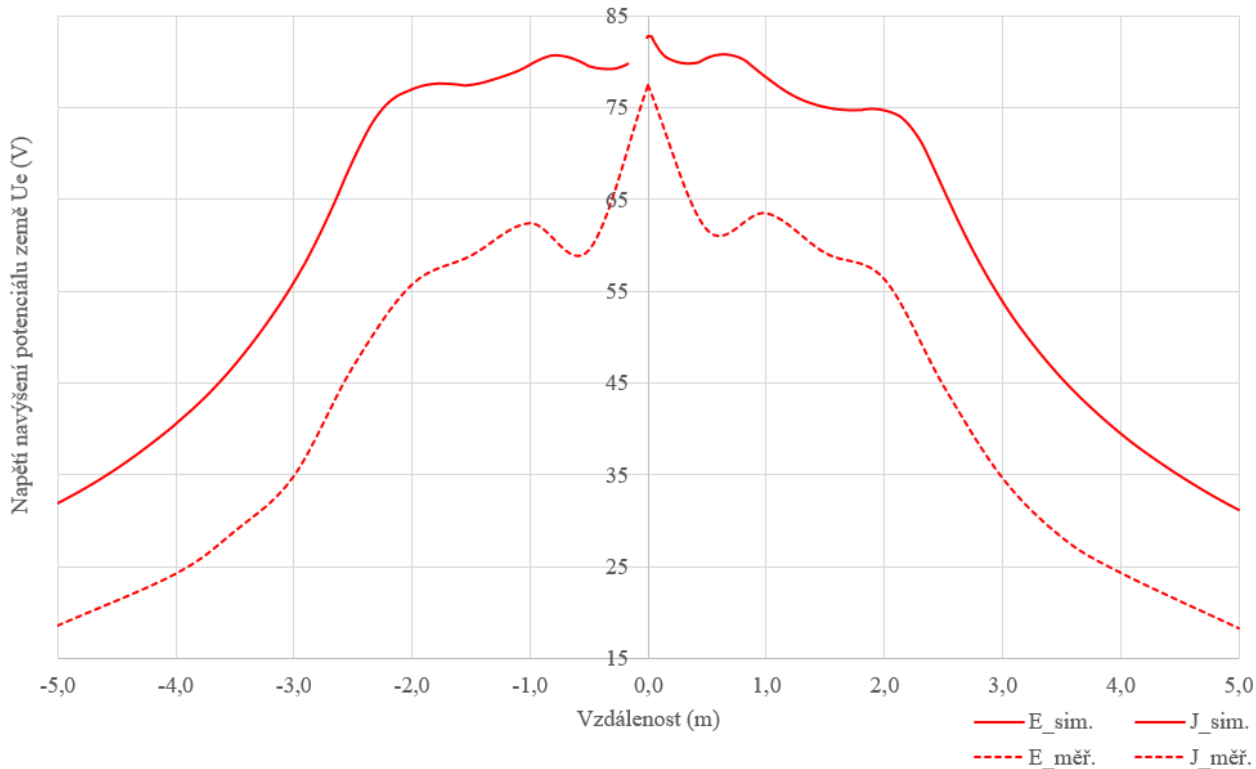
Vzdálenost (m)	Pozn.	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	φ_{el} ($^\circ$)	U_k (V/m)	U_E (V)	$U_{E\%}$ (%)	$U_{k\%} * U_E$ (%)
-2,0		2,654	-0,204	2,662	-4,40	-	54,78	100	-
-1,5		2,060	-0,201	2,070	-5,57	6,995	59,82	100	9,04
-1,0		1,830	-0,180	1,839	-5,62	4,791	61,78	100	6,19
-0,5		1,498	-0,156	1,506	-5,95	15,630	64,61	100	20,19
0,0		0,000	0,000	0,000	0,00	6,787	77,41	100	8,77
0,5		2,299	-0,160	2,305	-3,98	16,006	57,82	100	20,68
1,0		1,874	-0,185	1,883	-5,64	4,090	61,40	100	5,28
1,5		1,815	-0,175	1,823	-5,51	5,897	61,91	100	7,62
2,0		2,569	-0,202	2,577	-4,50	14,374	55,57	100	18,57
2,5		3,508	-0,214	3,515	-3,49	19,848	47,54	100	25,64
3,0		4,906	-0,242	4,912	-2,82	18,905	35,66	100	24,42
3,5		5,733	-0,254	5,739	-2,54	11,370	28,63	100	14,69
4,0		6,244	-0,264	6,250	-2,42	7,471	24,29	100	9,65
4,5		6,612	-0,272	6,618	-2,36	5,414	21,16	100	6,99
5,0		6,881	-0,276	6,887	-2,30	3,790	18,87	100	4,90
6,0		7,281	-0,283	7,286	-2,23	3,400	15,47	100	4,39
7,0		7,546	-0,286	7,551	-2,17	2,252	13,22	100	2,91
8,0		7,758	-0,289	7,763	-2,13	1,802	11,42	100	2,33
10,0		8,036	-0,295	8,041	-2,10	1,182	9,06	100	1,53
12		8,185	-0,297	8,190	-2,08	0,633	7,79	100	0,82
15		8,335	-0,295	8,340	-2,03	0,425	6,52	100	0,55
20		8,495	-0,298	8,500	-2,01	0,272	5,16	100	0,35
25		8,696	-0,297	8,701	-1,96	0,341	3,45	100	0,44
30		8,872	-0,299	8,877	-1,93	0,299	1,95	100	0,39
40		9,102	-0,303	9,107	-1,91	0,196	0,00	100	0,25

Graf simulace a měření rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemnicích kruhů v přímce PO0 pro reálný numerický model, $I_{RES} = 8,5$ A



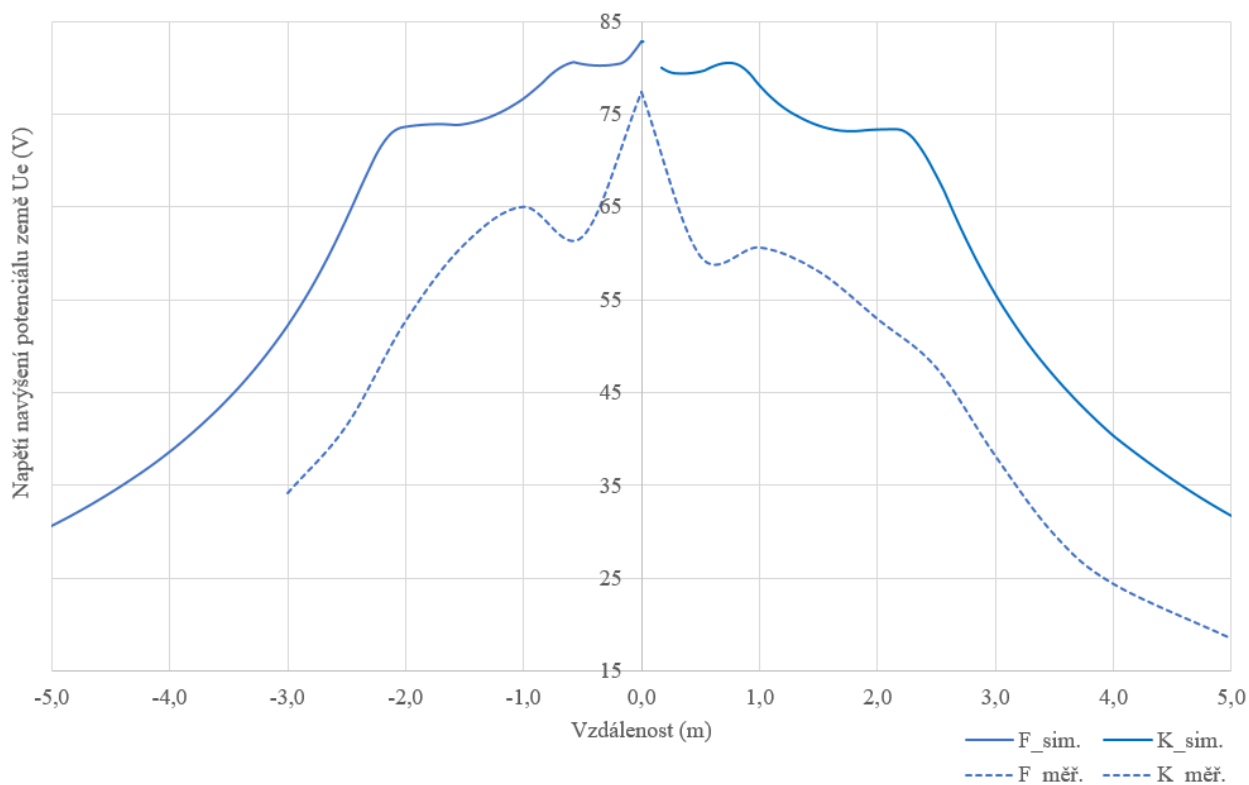
Tabulka naměřených hodnot při frekvenčním měření pro napětovou přímku PO1 (směry E a J)

Vzdálenost (m)	Pozn.	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	φ_{el} ($^\circ$)	U_k (V/m)	U_E (V)	$U_{E\%}$ (%)	$U_{k\%} * U_E$ (%)
-5,0		6,911	-0,273	6,916	-2,26	-	18,58	100	-
-4,0		6,247	-0,267	6,253	-2,45	5,641	24,22	100	7,29
-3,5		5,703	-0,257	5,709	-2,58	10,597	28,84	100	13,70
-3,0		5,000	-0,245	5,006	-2,81	17,850	34,82	100	23,07
-2,5		3,603	-0,204	3,609	-3,24	20,843	46,69	100	26,94
-2,0		2,546	-0,201	2,554	-4,51	12,114	55,66	100	15,66
-1,5		2,175	-0,194	2,184	-5,10	6,698	58,81	100	8,66
-1,0		1,756	-0,187	1,766	-6,08	0,627	62,36	100	0,81
-0,5		2,102	-0,182	2,110	-4,95	15,010	59,43	100	19,40
0,0		0,000	0,000	0,000	0,00	2,179	77,37	100	2,82
0,5		1,845	-0,177	1,853	-5,48	13,934	61,61	100	18,01
1,0		1,628	-0,192	1,639	-6,73	2,519	63,43	100	3,26
1,5		2,141	-0,195	2,150	-5,20	7,167	59,09	100	9,26
2,0		2,475	-0,193	2,483	-4,46	14,413	56,27	100	18,63
2,5		3,839	-0,224	3,846	-3,34	21,629	44,68	100	27,96
3,0		5,021	-0,248	5,027	-2,83	16,476	34,64	100	21,30
3,5		5,778	-0,260	5,784	-2,58	10,307	28,20	100	13,32
4,0		6,234	-0,268	6,240	-2,46	10,538	24,33	100	13,62
5,0		6,945	-0,278	6,951	-2,29	-	18,29	100	-

Graf simulace a měření rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemních kruhů v přímce PO1 pro reálný numerický model, $I_{RES} = 8,5$ A

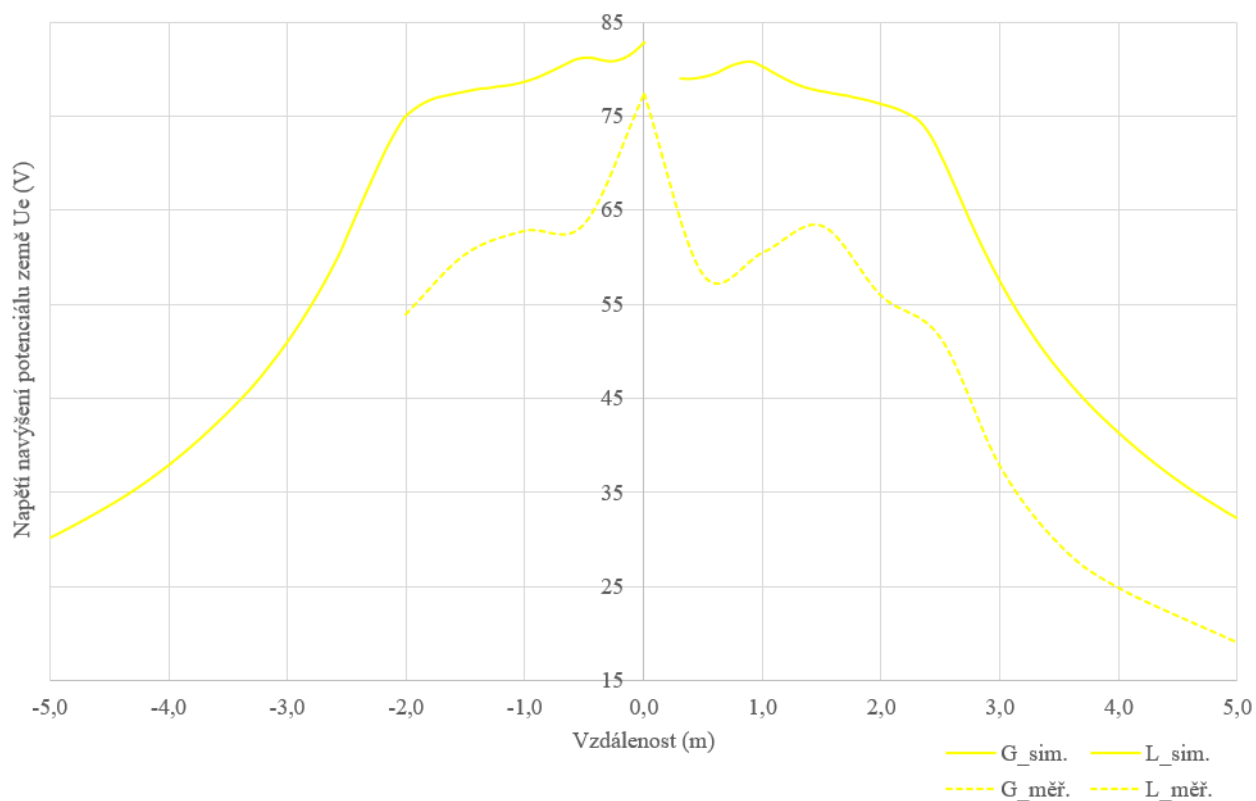
Tabulka naměřených hodnot při frekvenčním měření pro napětovou přímku PO2 (směry F a K)

Vzdálenost (m)	Pozn.	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	φ_{el} ($^\circ$)	U_k (V/m)	U_E (V)	$U_{E\%}$ (%)	$U_{k\%} * U_E$ (%)
-3,0		5,074	-0,231	5,079	-2,61	-	34,24	100	-
-2,5		4,217	-0,230	4,223	-3,12	18,532	41,51	100	23,94
-2,0		2,891	-0,215	2,899	-4,25	19,522	52,77	100	25,22
-1,5		1,917	-0,192	1,927	-5,72	12,296	61,03	100	15,88
-1,0		1,443	-0,165	1,452	-6,52	0,808	65,06	100	1,04
-0,5		1,823	-0,177	1,832	-5,55	12,345	61,84	100	15,95
0,0		0,000	0,000	0,000	0,00	2,155	77,41	100	2,78
0,5		2,078	-0,172	2,085	-4,73	16,744	59,69	100	21,63
1,0		1,960	-0,197	1,970	-5,74	1,593	60,67	100	2,06
1,5		2,263	-0,208	2,273	-5,25	7,714	58,09	100	9,97
2,0		2,869	-0,220	2,877	-4,38	10,404	52,95	100	13,44
2,5		3,489	-0,229	3,497	-3,76	14,789	47,69	100	19,11
3,0		4,611	-0,242	4,617	-3,00	18,014	38,16	100	23,27
3,5		5,610	-0,254	5,616	-2,59	13,781	29,68	100	17,80
4,0		6,233	-0,265	6,239	-2,43	10,528	24,38	100	13,60
5,0		6,926	-0,275	6,931	-2,27	-	18,49	100	-

Graf simulace a měření rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemnicích kruhů v přímce PO2 pro reálný numerický model, $I_{RES} = 8,5$ A

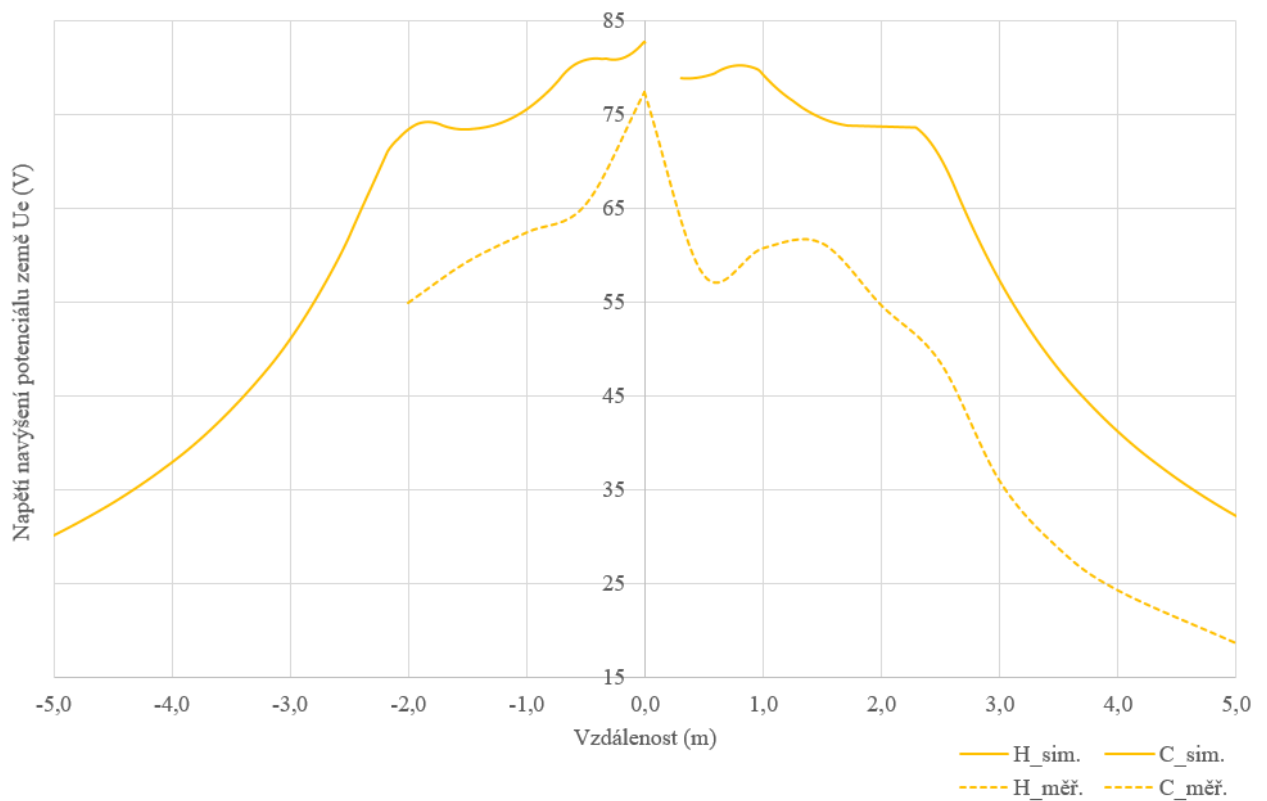
Tabulka naměřených hodnot při frekvenčním měření pro napětovou přímku PO3 (směry G a L)

Vzdálenost (m)	Pozn.	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	φ_{el} ($^\circ$)	U_k (V/m)	U_E (V)	$U_{E\%}$ (%)	$U_{k\%} * U_E$ (%)
-2,0		2,760	-0,229	2,769	-4,74	-	53,87	100	-
-1,5		2,004	-0,211	2,015	-6,01	8,916	60,28	100	11,52
-1,0		1,711	-0,181	1,721	-6,04	3,267	62,78	100	4,22
-0,5		1,622	-0,169	1,631	-5,95	14,625	63,55	100	18,89
0,0		0,000	0,000	0,000	0,00	5,438	77,41	100	7,02
0,5		2,265	-0,158	2,271	-3,99	16,886	58,11	100	21,81
1,0		1,980	-0,162	1,987	-4,68	5,258	60,52	100	6,79
1,5		1,640	-0,198	1,652	-6,88	4,612	63,37	100	5,96
2,0		2,521	-0,203	2,529	-4,60	11,950	55,91	100	15,44
2,5		3,051	-0,204	3,058	-3,83	18,122	51,42	100	23,41
3,0		4,655	-0,240	4,661	-2,95	21,955	37,79	100	28,36
3,5		5,635	-0,256	5,641	-2,60	12,924	29,46	100	16,70
4,0		6,176	-0,265	6,182	-2,46	10,044	24,87	100	12,98
5,0		6,860	-0,278	6,866	-2,32	-	19,05	100	-

Graf simulace a měření rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemnicích kruhů v přímce PO3 pro reálný numerický model, $I_{RES} = 8,5$ A

Tabulka naměřených hodnot při frekvenčním měření pro napětovou přímku PO4 (směry H a C)

Vzdálenost (m)	Pozn.	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	φ_{el} ($^\circ$)	U_k (V/m)	U_E (V)	$U_{E\%}$ (%)	$U_{k\%} * U_E$ (%)
-2,0		2,635	-0,248	2,647	-5,38	-	54,91	100	-
-1,5		2,120	-0,211	2,130	-5,68	7,495	59,30	100	9,68
-1,0		1,754	-0,196	1,765	-6,38	6,075	62,41	100	7,85
-0,5		1,404	-0,182	1,416	-7,39	15,002	65,38	100	19,38
0,0		0,000		0,000	0,00	7,457	77,41	100	9,63
0,5		2,286	-0,180	2,293	-4,50	16,642	57,92	100	21,50
1,0		1,948	-0,197	1,958	-5,77	3,392	60,77	100	4,38
1,5		1,884	-0,194	1,894	-5,88	6,068	61,31	100	7,84
2,0		2,664	-0,204	2,672	-4,38	12,723	54,70	100	16,44
2,5		3,384	-0,214	3,391	-3,62	18,728	48,59	100	24,19
3,0		4,869	-0,244	4,875	-2,87	19,814	35,97	100	25,60
3,5		5,716	-0,257	5,722	-2,57	11,658	28,77	100	15,06
4,0		6,241	-0,266	6,247	-2,44	10,597	24,31	100	13,69
5,0		6,904	-0,280	6,910	-2,32	-	18,68	100	-

Graf simulace a měření rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemnicích kruhů v přímce PO4 pro reálný numerický model, $I_{RES} = 8,5$ A

Tabulka naměřených hodnot při frekvenčním měření pro napětovou přímku PO5 (směry I a D)

Vzdálenost (m)	Pozn.	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)	φ_{el} ($^\circ$)	U_k (V/m)	U_E (V)	$U_{E\%}$ (%)	$U_{k\%} * U_E$ (%)
-3,0		5,394	-0,263	5,400	-2,79	-	31,46	100	-
-2,5		4,615	-0,246	4,622	-3,05	23,031	38,08	100	29,77
-2,0		2,683	-0,205	2,691	-4,37	21,827	54,50	100	28,21
-1,5		2,044	-0,199	2,054	-5,56	9,475	59,91	100	12,25
-1,0		1,564	-0,195	1,576	-7,11	4,422	63,97	100	5,72
-0,5		1,522	-0,187	1,533	-7,00	13,397	64,33	100	17,32
0,0		0,000	0,000	0,000	0,00	6,180	77,37	100	7,99
0,5		2,253	-0,184	2,261	-4,67	16,563	58,15	100	21,41
1,0		1,939	-0,193	1,949	-5,68	3,960	60,80	100	5,12
1,5		1,782	-0,212	1,795	-6,78	1,590	62,11	100	2,06
2,0		2,125	-0,213	2,136	-5,72	13,603	59,21	100	17,58
2,5		3,387	-0,231	3,395	-3,90	21,478	48,51	100	27,76
3,0		4,656	-0,245	4,662	-3,01	19,492	37,74	100	25,19
3,5		5,682	-0,261	5,688	-2,63	12,788	29,02	100	16,53
4,0		6,161	-0,269	6,167	-2,50	9,918	24,95	100	12,82
5,0		6,902	-0,281	6,908	-2,33	-	18,65	100	-

Graf simulace a měření rozložení potenciálu povrchu země v okolí zemnicích kruhů v přímce PO5 pro reálný numerický model, $I_{RES} = 8,5$ A