

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# 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

## VYTVOŘENÍ LABORATORNÍHO MODELU ZEMNÍCÍ SOUSTAVY

CREATION OF A LABORATORY MODEL OF THE EARTH SYSTEM

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Moliš

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Topolánek, Ph.D.

BRNO 2016



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Martin Moliš

**ID:** 154810

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Vytvoření laboratorního modelu zemnicí soustavy

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis problematiky a způsobu provedení zemnicích soustav distribučních sítí na úrovni VN/NN.
2. Geometrický popis konkrétních zemnicích soustav, které budou předmětem navrhovaného modelu a výpočet jejich zemních odporů.
3. Návrh modelu zemnicí soustavy a jeho příprava.
4. Ověření navrženého modelu a realizace popisné zprávy modelu s příklady možností pro jeho použití.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 24.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. David Topolánek, Ph.D.

**Konzultant bakalářské práce:**

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

#### UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

MOLIŠ, M. *Vytvoření laboratorního modelu zemnicí soustavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 81 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Topolánek, Ph.D..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Davidu Topolánkovi, Ph.D. za podnětné rady, ochotu a trpělivost po celou dobu realizace této práce. Dále bych rád poděkoval panu Jiřímu Bendovi za materiál věnovaný pro sestavení modelu a také své rodině za podporu během celé doby mého studia.

.....

**ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá návrhem laboratorního modelu zemnicí soustavy, na kterém bude možno měřit rozložení elektrického potenciálu na povrchu země, velikost krokového a dotykového napětí v závislosti na použitém typu zemniče. Dále transfer potenciálu a vliv přítomnosti cizí zemnicí soustavy na celkový zemní odpor. Cílem práce je simulovat, s využitím modelu, chování zemnicích soustav při poruše v laboratorních podmínkách. Tento model bude dále používán k laboratorní výuce.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Zemnicí soustava; zemniče; krokové napětí; rozložení potenciálu na povrchu země; transfer potenciálu; dotykové napětí; navýšení potenciálu

**ABSTRACT**

This work deals with designing of grounding system model. This model might be used for potential distribution, step and touch voltage measuring, depending on particular grounding system. Moreover measuring transferred potential into another grounding system and the influence of foreign grounding system's presence on the overall earth resistance. The aim of this work is to create a simulation on the model of whole system's behaviour during a fault on the power line. This model also might be used for laboratory classes.

**KEY WORDS:** Grounding system; step voltage; touch voltage; potential distribution on ground surface; potential transfer; increase of potential

**OBSAH**

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>16</b>
<b>2 ZPŮSOBY UZEMNĚNÍ SOUSTAV VN/NN A JEJICH KONSTRUKCE .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 ZPŮSOBY UZEMNĚNÍ UZLU V SÍTÍCH NN .....</b>	<b>17</b>
2.1.1 Síť TN.....	17
2.1.2 Síť TT .....	19
2.1.3 Síť IT .....	19
<b>2.2 VLV UZEMŇOVACÍ SOUSTAVY VN NA SOUSTAVU NN.....</b>	<b>20</b>
2.2.1 SPOLEČNÁ ZEMNICÍ SOUSTAVA VN A NN ČÁSTI.....	20
2.2.2 ODDĚLENÁ UZEMŇOVACÍ SOUSTAVA .....	21
<b>2.3 KONSTRUKCE NEJPOUŽÍVANĚJŠÍCH TYPŮ ZEMNICÍCH SOUSTAV.....</b>	<b>22</b>
2.3.1 KIOSKOVÁ ZDĚNÁ TRANSFORMOVNA 22/0,4 kV S BETONOVÝM ZÁKLADEM .....	22
2.3.2 STOŽÁROVÁ JEDNOSLOUPOVÁ TRANSFORMOVNA 22/0,4 kV NA BETONOVÉM SLOUPU (PLATÍ I PRO PŘÍHRADOVÉ TS) .....	22
2.3.3 KIOSKOVÁ BLOKOVÁ TRANSFORMOVNA 22/0,4 kV .....	23
2.3.4 PŘÍKLAD UZEMNĚNÍ ÚSEKOVÉHO ODPÍNAČE.....	24
<b>2.4 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ KE KONSTRUKCI ZEMNÍČŮ .....</b>	<b>24</b>
2.4.1 PÁSEK FEZN 30x4 MM.....	24
2.4.2 ZEMNICÍ TYČ ZPT 20 .....	25
<b>3 POŽADAVKY NA ZEMNICÍ SOUSTAVY.....</b>	<b>26</b>
3.1 ZEMNÍ ODPOR A REZISTIVITA PŮDY .....	26
3.2 DOTYKOVÁ A KROKOVÁ NAPĚTÍ.....	26
<b>4 KONSTRUKCE MODELU.....</b>	<b>28</b>
4.1 SLOŽENÍ A REZISTIVITA PŮDY.....	28
4.2 VLHKOST .....	29
<b>5 POUŽITÉ MODELY ZEMNÍČŮ A JEJICH ZEMNÍ ODPOR.....</b>	<b>30</b>
5.1 POLOKULOVÝ ZEMNÍČ.....	30
5.2 ZEMNICÍ TYČ .....	30
5.3 JEDEN EKVIPOTENCIÁLNÍ KRUH.....	31
5.4 DVA EKVIPOTENCIÁLNÍ KRUHY .....	31
5.5 DVA ZEMNICÍ PÁSKY .....	33
5.6 MODEL ZEMNICÍ SOUSTAVY ZDĚNÉ KIOSKOVÉ TRANSFORMOVNY .....	34
5.7 MODEL ZEMNICÍ SOUSTAVY KIOSKOVÉ BLOKOVÉ TRAFOSTANICE .....	36
<b>6 MĚŘENÍ NA MODELU.....</b>	<b>38</b>
6.1 MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY POMOCÍ PRIMÁRNÍHO TESTERU OMICRON CPC 100.....	38

---

6.2 MĚŘENÍ ZEMNÍHO ODPORU UZEMNĚNÍ – PROUDOVÁ METODA .....	40
6.3 MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ POTENCIÁLU.....	41
7 MĚŘÍTKA .....	42
7.1 MĚŘÍTKO DÉLKY.....	42
7.2 ODPOROVÉ MĚŘÍTKO.....	42
7.3 MĚŘÍTKO NAPĚTÍ.....	42
7.4 MĚŘÍTKO PROUDU .....	42
7.5 POUŽITÍ MĚŘÍTEK, OVĚŘENÍ MĚŘÍTKA ODPORU .....	42
8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	44
8.1 TYČOVÝ ZEMNIČ .....	45
8.2 POLOKULOVÁ ZEMNÍCI ELEKTRODA.....	45
8.3 JEDEN EKVIPOTECIÁLNÍ KRUH.....	46
8.4 DVA EKVIPOTECIÁLNÍ KRUHY .....	47
8.5 DVA PÁSKY .....	48
8.6 MODEL ZEMNÍCI SOUSTAVY ZDĚNÉ KIOSKOVÉ TRANSFORMOVNY.....	49
8.7 MODEL ZEMNÍCI SOUSTAVY KIOSKOVÉ BLOKOVÉ TRAFOSTANICE .....	50
8.8 SHRNU TÍ.....	51
8.9 SROVNÁNÍ ZEMNIČŮ – MODEL VS. REALITA .....	52
9 TRANSFER POTENCIÁLU.....	54
9.1 MĚŘENÍ PŘENOSU POTENCIÁLU.....	54
9.2 VÝSTUP MĚŘENÍ.....	55
10 KONTROLA NEBEZPEČNÝCH KROKOVÝCH NAPĚTÍ.....	58
11 ZÁVĚR.....	59
POUŽITÁ LITERATURA .....	60
PŘÍLOHY .....	61
PŘÍLOHA A – DOPLNĚNÍ KAPITOLY 5, TABULKY MĚŘENÝCH HODNOT, GRAFY V POMĚRNÝCH HODNOTÁCH.....	61
TYČOVÝ ZEMNIČ.....	61
POLOKULOVÁ ZEMNÍCI ELEKTRODA.....	64
JEDEN EKVIPOTECIÁLNÍ KRUH.....	67
DVA EKVIPOTECIÁLNÍ KRUHY .....	70
DVA ZEMNÍCI PÁSKY .....	73
MODEL ZEMNÍCI SOUSTAVY ZDĚNÉ KIOSKOVÉ TRANSFORMOVNY.....	76
MODEL ZEMNÍCI SOUSTAVY KIOSKOVÉ BLOKOVÉ TRAFOSTANICE .....	79

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 – Síť typu TN-C [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-2 – Síť typu TN-S [1] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-3 – Síť typu TN-C-S [1] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-4 – Síť typu TT [1] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-5 – Síť typu IT [1] .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-6 – Porucha na NN straně [2] .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-7 – Porucha na VN straně [2] .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-8 – Zemnicí soustava kioskové zděné transformovny 22/0,4 kV s betonovým základem [3] .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2-9 – Strojený zemnič ve formě dvou ekvipotenciálních kruhů [3] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 2-10 – Strojený zemnič ve formě dvou zemnicích pásků [3] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 2-11 – Strojený zemnič ve formě čtyř zemnicích pásků, modifikováno z [3] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 2-12 – Zemnicí soustava kioskové blokované trafostanice [3] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-13 – Uzemnění úsekového odpínače pomocí dvou ekvipotenciálních kruhů [3] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-14 – Profil FeZn pásku 30x4 mm [3] .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 2-15 – Náskres zemnicí tyče ZPT [3] .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-1 – Znázornění dotykového a krokového napětí v závislosti na rozložení potenciálu na povrchu země [5] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3-2 – Dovolené hodnoty dotykového napětí [5] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-1 – Schéma modelu, rozměry jsou udávány v mm .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5-1 – Model polokulové elektrody.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 5-2 – Model zemnicí tyče .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5-3 – Model ekvipotenciálního kruhu .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5-4 – Model dvou ekvipotenciálních kruhů.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5-5 – Koeficient <math>K_{11}</math> pro ocelovou výztuž pilotového základu nebo základu stožáru [3] .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5-6 – Model dvou zemnicích pásků.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5-7 – 5.6 Model zemnicí soustavy zděné kioskové transformovny.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5-8 – Koeficient využití tyčových zemničů v závislosti na poměru vzdálenosti mezi tyčemi a jejich délkou [3].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 5-9 – 5.7 Model zemnicí soustavy kioskové blokované trafostanice.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 6-1 – Přípravek pro měření rezistivity půdy .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6-2 – Schéma zapojení Omicron CPC 100 pro měření rezistivity půdy [6] .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6-3 – Nastavení Omicron CPC 100 pro měření rezistivity [6] .....</i>	<i>39</i>

<i>Obr. 6-4 – Měření zemního odporu soustavy</i> .....	40
<i>Obr. 6-5 – Elektrické schéma zapojení měření zemního odporu soustavy</i> .....	40
<i>Obr. 6-6 – Měření rozložení potenciálu v osách X a Y</i> .....	41
<i>Obr. 6-7 – Elektrické schéma měření rozložení potenciálu</i> .....	41
<i>Obr. 8-1 – Rozložení potenciálu v okolí tyčového zemniče</i> .....	45
<i>Obr. 8-2 – Krokové napětí v okolí tyčového zemniče</i> .....	45
<i>Obr. 8-3 – Rozložení potenciálu v okolí polokulové zemnicí elektrody</i> .....	46
<i>Obr. 8-4 – Krokové napětí v okolí polokulové zemnicí elektrody</i> .....	46
<i>Obr. 8-5 – Rozložení potenciálu v okolí ekvipotenciálního kruhu</i> .....	47
<i>Obr. 8-6 – Krokové napětí v okolí ekvipotenciálního kruhu</i> .....	47
<i>Obr. 8-7 – Rozložení potenciálu v okolí dvou ekvipotenciálních kruhů</i> .....	48
<i>Obr. 8-8 – Krokové napětí v okolí dvou ekvipotenciálních kruhů</i> .....	48
<i>Obr. 8-9 – Rozložení potenciálu v okolí dvou zemnicích pásků</i> .....	49
<i>Obr. 8-10 – Krokové napětí v okolí dvou zemnicích pásků</i> .....	49
<i>Obr. 8-11 – Rozložení potenciálu v okolí Zemniče 1</i> .....	50
<i>Obr. 8-12 – Krokové napětí v okolí Zemniče 1</i> .....	50
<i>Obr. 8-13 – Rozložení potenciálu v okolí Zemniče 2</i> .....	51
<i>Obr. 8-14 – Krokové napětí v okolí Zemniče 2</i> .....	51
<i>Obr. 9-1 – Elektrické schéma měření transferu potenciálu</i> .....	54
<i>Obr. 9-2 – Měření transferu potenciálu</i> .....	55
<i>Obr. 9-3 – Graf transferu potenciálu ze zemniče P na zemnič S, modrá křivka reprezentuje <math>U_{trans}</math>, červená <math>\varphi</math></i> .....	56
<i>Obr. 9-4 – Vliv vzdálenosti zemniče S na celkové zemní odpor zemnicí soustavy P</i> .....	56
<i>Obr. 10-1 – Kontrola nebezpečných krokových napětí</i> .....	58
<i>Obr. 10-2 – Model rodinného domu s připojeným PEN vodičem k obvodovému zemniči, model distribuční trafostanice</i> .....	58

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 3-1 – Orientační hodnoty rezistivity pro různé typy půd [5] .....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 5-1 – Koefficient využití <math>\eta_{pn}</math> v závislosti na počtu použitých pásků [3] .....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 8-1 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního odporu tyčového zemniče .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 8-2 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního odporu polokulové zemnicí elektrody .....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 8-3 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního odporu ekvipotenciálního kruhu .....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 8-4 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního odporu dvou ekvipotenciálních kruhů .....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 8-5 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního odporu dvou zemnicích pásků .....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 8-6 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního Zemniče 1 .....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 8-7 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního Zemniče 2 .....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 8-8 – Shrnutí měření .....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 8-9 – Porovnání krokových napětí .....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 8-10 – Porovnání zemních odporů zemničů reálných a modelů přepočítaných na reálné hodnoty .....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 9-1 – Výchozí stav měření, před založením sekundárního zemniče .....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 9-2 – Změřené hodnoty transferu potenciálu .....</i>	<i>57</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Význam	Jednotka
$a, b$	rozměry zemnicí soustavy	cm
$d$	průměr drátu	cm
$D$	průměr zemnicího kruhu	cm
$D_{\text{ekv}}$	ekvivalentní průměr obdélníkové zemnicí soustavy	cm
$D_p$	průměr sloupu	m
$d_w$	vzdálenost elektrod pro měření Wernnerovou metodou	cm
$I_e$	zemní proud	A
$I_{\text{měř}}$	měřená hodnota zemního proudu	A
$I_{\text{skut}}$	reálný zemní proud	A
$L$	délka zemniče	cm
$l_m$	modelová délka	cm
$L_p$	hloubka uložení	m
$l_r$	skutečná délka	m
$l_x$	vzdálenost na ose X	cm
$l_{x\text{max}}$	maximální vzdálenost na ose X	cm
$l_y$	vzdálenost na ose Y	cm
$M_I$	měřítka proudu	-
$M_l$	měřítka délky	-
$M_R$	měřítka odporu	-
$M_U$	měřítka napětí	-
$n$	počet zemničů	-
$R_e$	zemní odpor	$\Omega$
$R_{\text{ec}}$	celkový zemní odpor primárního zemniče	$\Omega$
$R_{\text{ecs}}$	skutečný celkový zemní odpor primárního zemniče	$\Omega$
$R_{\text{eměř}}$	měřený zemní odpor	$\Omega$
$R_{\text{Eo}}$	zemní odpor obvodového zemniče	$\Omega$
$R_{\text{Ep}}$	zemní odpor páskového zemniče	$\Omega$
$R_{\text{Epo}}$	zemní odpor polokulové zemnicí elektrody	$\Omega$
$R_{\text{Epn}}$	zemní odpor $n$ páskový zemničů	$\Omega$
$R_{\text{esp}}$	skutečný zemní odpor přepočítaný podle měřítka	$\Omega$

$R_{esr}$	vypočítaná hodnota skutečného zemního odporu	$\Omega$
$R_{Et}$	zemní odpor tyčového zemniče	$\Omega$
$R_{EV}$	výsledný zemní odpor soustavy	$\Omega$
$R_{Ez}$	zemní odpor základového zemniče	$\Omega$
$R_{E1k}$	zemní odpor jednoho ekvipotenciálního kruhu	$\Omega$
$R_{E1kv}$	zemní odpor vnitřního kruhu	$\Omega$
$R_{E1kvn}$	zemní odpor vnějšího kruhu	$\Omega$
$R_{E2k}$	zemní odpor dvou ekvipotenciálních kruhů	$\Omega$
$R_m$	modelová hodnota odporu	$\Omega$
$R_{měř}$	měřená hodnota odporu	$\Omega$
$R_{skut}$	skutečná hodnota odporu	$\Omega$
$R_{st}$	zemní odpor stožárového základu	$\Omega$
$R_W$	zemní odpor změřený Wernnerovou metodou	$\Omega$
$t_F$	doba trvání poruchy	ms
$U_e$	navýšení potenciálu zemniče	V
$U_{emax}$	maximální navýšení potenciálu zemniče	V
$U_{ep}$	navýšení potenciálu primární elektrody	V
$U_{eskut}$	reálné navýšení potenciálu zemniče	V
$U_{měř}$	měřená hodnota napětí	V
$U_S$	krokové napětí	V
$U_{S\%}$	poměrná hodnota krokového napětí	%
$U_{Sm}$	modelová hodnota krokového napětí	V
$U_{SmaxX}$	nejvyšší hodnota krokového napětí v ose X	V
$U_{SmaxY}$	nejvyšší hodnota krokového napětí v ose Y	V
$U_{SmaxY2}$	nejvyšší hodnota krokového napětí v ose Y2	V
$U_{Sskut}$	skutečná hodnota krokového napětí	V
$U_T$	dotykové napětí	V
$U_{trans}$	transfer potenciálu	V
$U_{trans\%}$	poměrná hodnota transferu potenciálu	%
$\Delta R_e$	absolutní chyba měřeného a vypočítaného odporu	$\Omega$
$\Delta R_{e\%}$	relativní chyba měřeného a vypočítaného odporu	%
$\Delta R_{es}$	absolutní chyba zemního odporu při srovnání realita-model	$\Omega$
$\Delta R_{es+/-}$	srovnání hodnot zemního odporu realita-model pro ověření měřítka	$\Omega$

---

$\eta$	koeficient reprezentující využití jednotlivých částí soustavy	-
$\eta_1$	koeficient využití tyčových zemniců	-
$\eta_{12}$	koeficient využití zemnicí soustavy	-
$\eta_{pn}$	koeficient využití soustavy skládající se z pásků	-
$\rho_e$	rezistivita půdy	$\Omega\text{m}$
$\rho_{em}$	rezistivita půdy modelu	$\Omega\text{cm}$
$\varphi$	rozložení potenciálu na povrchu země	V
$\varphi\%$	poměrné hodnoty rozložení potenciálu vztažení k $U_e$	%
$\varphi_k$	korigovaná hodnota rozložení potenciálu	V
$\varphi_{\text{původní}}$	původní měřené rozložení potenciálu	V
$\varphi_{X1}$	potenciál měřený v bodě X1	V
$\varphi_{X2}$	potenciál měřený v bodě X2	V

# 1 ÚVOD

Správný návrh a konstrukce zemnicí soustavy hrají klíčovou roli při eliminaci následků poruch v elektrizační soustavě. Může se jednat o problémy provozní, jako například vhodná reakce ochran, ale i problémy spojené s úrazem elektrickým proudem. Bezpečnost osob pohybujících se v okolí daného elektrického zařízení závisí na kvalitě provedení jeho uzemnění. To určuje velikost dotykového a krokového napětí v okolí elektrického zařízení. Je tedy vždy nutno volit takovou konstrukci zemnicí soustavy, aby byla zajištěna bezpečnost provozu celé soustavy i osob.

V reálné síti nelze jednoduše měřit a simulovat poruchové stavy nebo některé jevy, například transfer potenciálu. Proto je vhodné pro simulaci těchto stavů využít fyzický model, kdy zemnicí soustavy a vnější parametry lze lehce konfigurovat.

## 2 ZPŮSOBY UZEMNĚNÍ SOUSTAV VN/NN A JEJICH KONSTRUKCE

Smyslem zemnicí soustavy je udržování určité části elektrického zařízení na potenciálu země. To umožňuje a napomáhá vlastní funkci elektrických zařízení, strojů a přístrojů. Dále zemnicí soustava napomáhá chránit elektrická zařízení před účinky přepětí a účinky velkých proudů, zajišťuje schopnost svést atmosférické proudy a omezit přepětí.

### 2.1 Způsoby uzemnění uzlu v sítích NN

Jednotlivé typy sítí můžeme rozlišovat dle způsobu uzemnění uzlu distribučního transformátoru. Každému typu sítě je pak přiřazen písemný kód, který definuje uzemnění sítě, vztah neživých částí a uzemnění, a pokud existuje, uspořádání středních a ochranných vodičů.

V kódu sítě první písmeno (T nebo I) udává způsob spojení uzlu transformátoru se zemí. V případě písmene T je soustava uzemněná a v případě I izolovaná. Druhé písmeno kódu udává, jaký je vztah neživých částí v rozvodu a uzemnění. V případě znaku T jsou neživé části přímo spojeny se zemí, N vyjadřuje přímé spojení neživých částí s uzemněným bodem sítě. Poslední znak v kódu značí, jaké je uspořádání středních a ochranných vodičů (pokud existuje). V síti s označením C je funkce středního a ochranného vodiče sloučena v jediném vodiči. V případě sítě, kde jako poslední znak figuruje S, je ochranný vodič veden nezávisle na středním [1].

#### 2.1.1 Síť TN

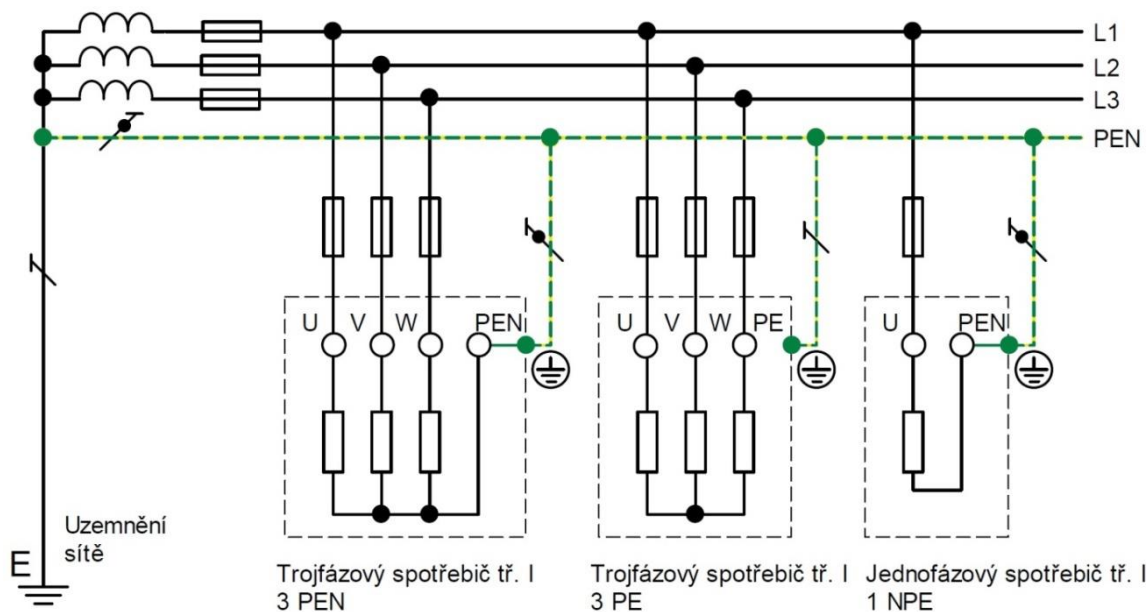
Síť typu TN patří k nejpoužívanějším a nejběžnějším na území ČR. Veškeré neživé části zařízení jsou spojeny pomocí ochranného vodiče s jedním uzlem (nulový nebo střední bod), který je uzemněn. V případě, že nulový nebo střední bod není k dispozici nebo je nedosažitelný, je nutno uzemnit vodič vedení.

Pro ochranu při poruše mohou být v sítích typu TN použity tyto ochranné prvky:

- nadproudové ochranné přístroje (pojistka, jistič)
- proudový chránič (nesmí být použit v síti typu TN-C vzhledem k jeho funkčnímu principu). V případě použití v síti TN-C-S nesmí být vodič PEN použit za chráničem na straně zátěže [1].

##### 2.1.1.1 TN-C

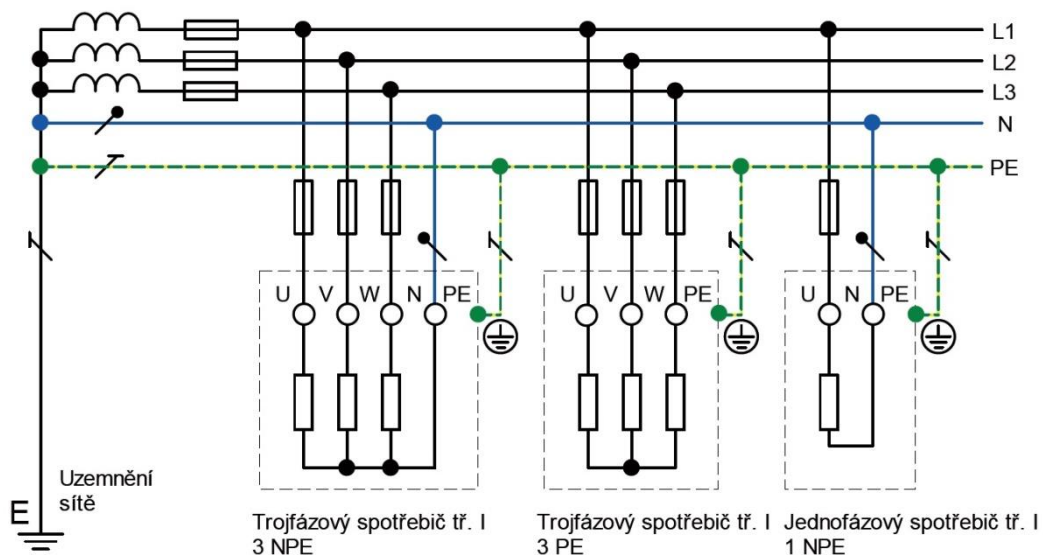
V případě typu sítě TN-C (z francouzského *combiné*, tedy kombinovaný) PEN vodič kombinuje funkci nulového a ochranného vodiče. Schéma sítě je znázorněno na Obr. 2-1– Síť typu TN-C. Síť tohoto typu se používá v rozvodu elektrické energie se jmenovitým napětím do 1 kV. Oproti síti typu TN-S je ekonomicky méně náročná z důvodu použití vodiče PEN namísto dvou PE a N. Ochrana automatickým odpojením od zdroje však reaguje pouze v případě spojení fáze se zemí. Pokud je střední vodič přerušen, mohou na neživých částech vznikat nebezpečná dotyková napětí. Na tuto poruchu ochrana automatickým odpojením nereaguje. Pro síť se jmenovitým napětím 230 V AC musí být porucha odpojena do 0,2 s [1],[2].



Obr. 2-1– Síť typu TN-C [1]

### 2.1.1.2 TN-S

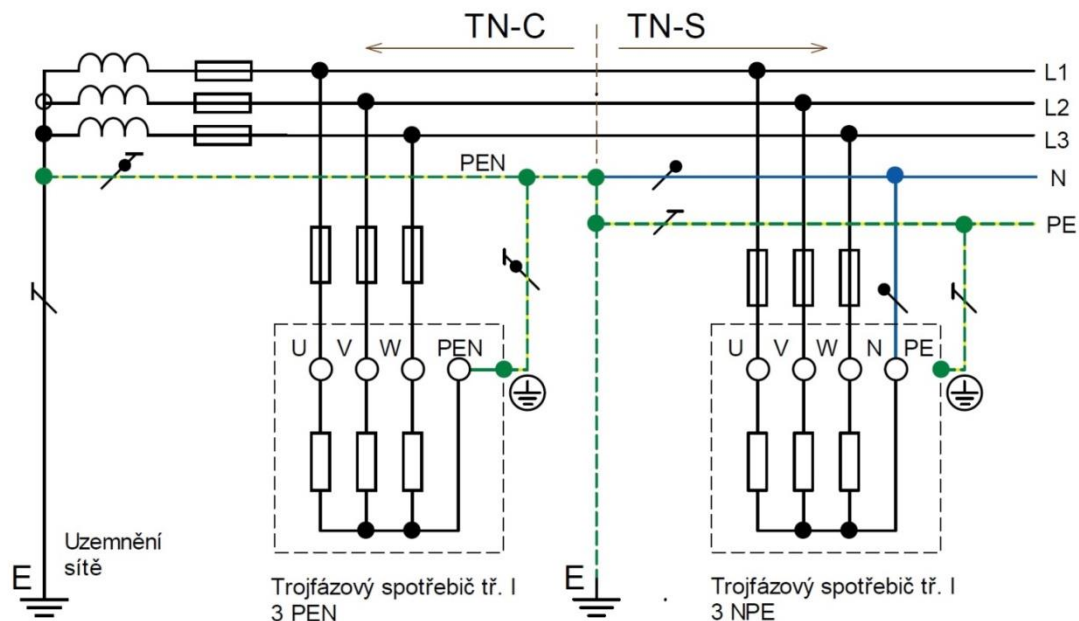
Opět z francouzského *séparé*, tedy oddělený, rozlišujeme v tomto typu sítě nulový vodič N a ochranný vodič PE. I síť typu TN-S je používána do jmenovitého napětí 1 kV. Díky oddělení funkce středního a ochranného vodiče je možno aplikovat ochranu proudovým chráničem. V případě poruchy středního vodiče proudový chránič vybavuje a na neživých částech se nemohou vyskytnout nebezpečná dotyková napětí [1],[2]. Schéma sítě je znázorněno na Obr. 2-2.



Obr. 2-2 – Síť typu TN-S [1]

### 2.1.1.3 TN-C-S

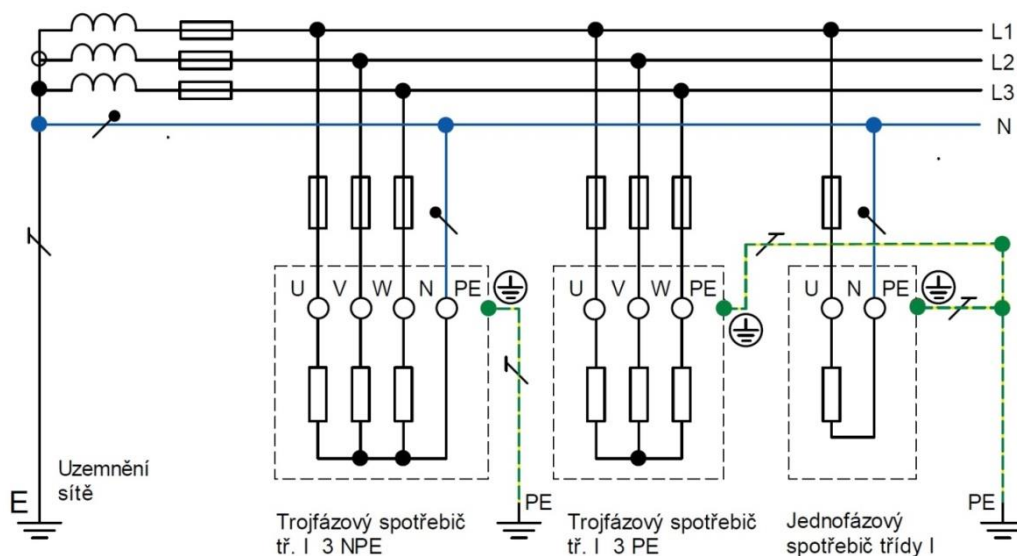
V části sítě typu TN-C-S je nulový o ochranný vodič sloučen do jednoho (PEN). Poté v druhém úseku sítě jsou vodiče odděleny a nesmí být dále spojeny opět do jednoho. V místě rozdělení musí být provedeno přizemnění [1].



Obr. 2-3 – Síť typu TN-C-S [1]

### 2.1.2 Síť TT

V tomto typu sítě je jeden bod přímo uzemněný, střední vodič nemusí být vyvedený (např. v sítích VN a VVN). U všech elektrických zařízení, která jsou k síti připojena, je pak spojení se zemí provedeno nezávisle na uzemnění sítě. Ochrana před nebezpečným dotykovým napětím u neživých částí je prováděna samostatně pro každé elektrické zařízení. Porucha musí být odpojena do 0,07 s [1],[2]. Schéma sítě typu TT je na Obr. 2-4.

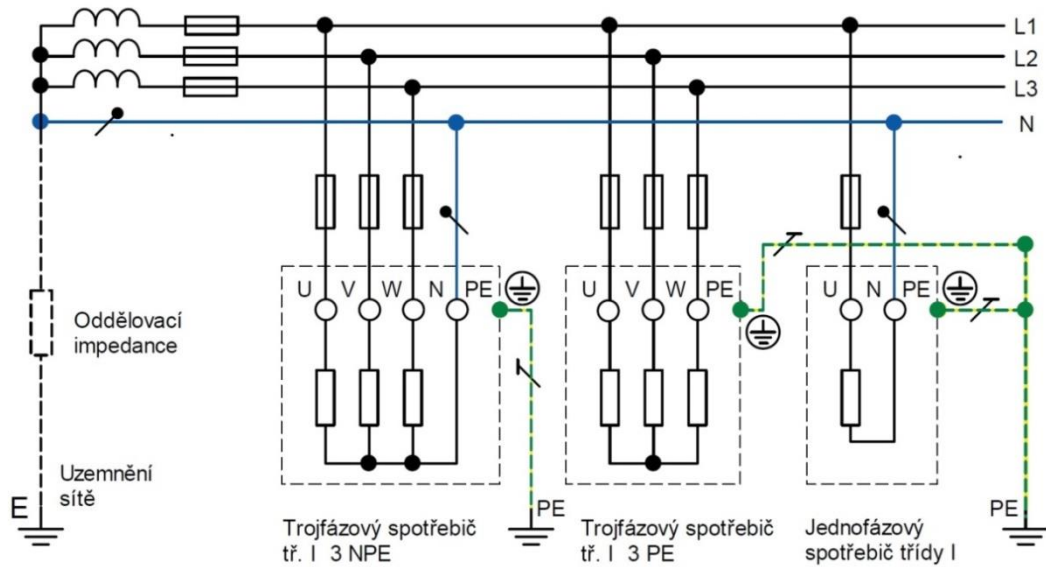


Obr. 2-4 – Síť typu TT [1]

### 2.1.3 Síť IT

U sítě IT jsou všechny živé části izolovány od země nebo jsou se zemí spojeny přes velkou (oddělovací) impedanci. Neživé části elektrických zařízení připojených k síti jsou uzemněny. V případě poruchy mezi fází a zemí se pak nejedná o zkrat, ale tzv. zemní spojení. Výhodou je

možnost provozu soustavy za přítomnosti poruchy na jedné fázi, kdy je poruchový proud relativně malý. Toho se využívá v distribučních sítích 22 kV [1].



Obr. 2-5 – Síť typu IT [1]

Použitý zemnič je dimenzován v závislosti na typu sítě vždy na nejneprůzračnější působení procházejícího proudu, jeho velikost a dobu trvání.

## 2.2 Vliv uzemňovací soustavy VN na soustavu NN

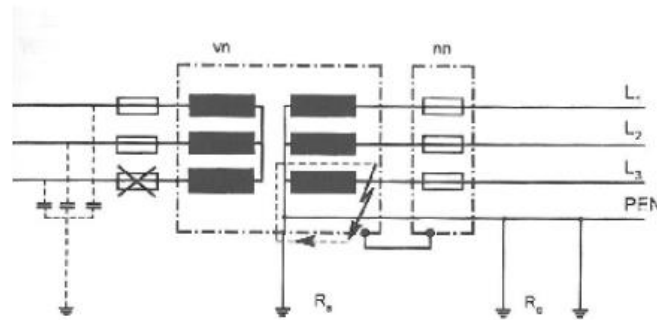
Při návrhu zemnicí soustavy je třeba posoudit chování uzemnění trafostanice vzhledem k sítím odběratelů elektrické energie nízkého napětí. Bezpečnost je zajištěna spojením nebo rozdělením zemnicích soustav obou částí. Na základě možných nebezpečných stavů je poté určeno, která z variant bude pro konkrétní situaci použita.

### 2.2.1 Společná zemnicí soustava VN a NN části

Zde rozlišujeme dva typy poruchy – na VN nebo na NN straně distribučního transformátoru.

#### 2.2.1.1 Porucha na NN straně

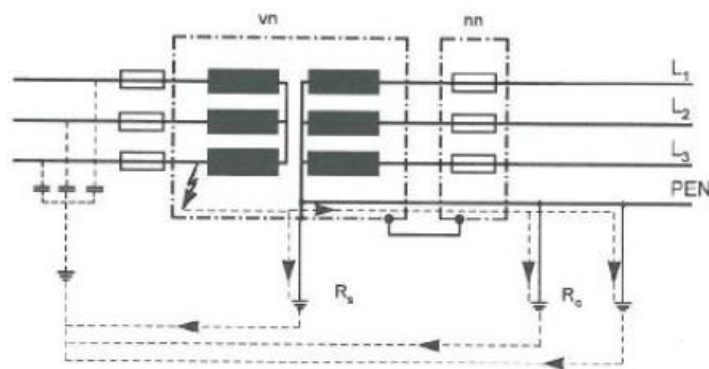
V případě poruchy izolace NN strany tvoří poruchovou smyčku impedance vodiče PEN směrem k uzlu, situace znázorněná na Obr. 2-6. Velikost této impedance je však zanedbatelná. Zkratový příspěvek NN strany bude nulový, jelikož na straně NN není uvažován zdroj proudu. V případě strany VN se dle Ohmova zákona bude poruchový proud v závislosti na zkratovém výkonu sítě přibližovat k nekonečnu. Vybavuje tedy ochrana na straně VN, v tomto případě nevznikají žádná dotyková ani kroková napětí [2].



Obr. 2-6 – Porucha na NN straně [2]

### 2.2.1.2 Porucha na VN straně

Tato situace je znázorněna na Obr. 2-7. Při poruše na VN straně distribučního transformátoru se celá transformovna dostane na stejný potenciál a tudíž zde nevznikají žádná dotyková napětí. Na PEN vodiči se pak mohou objevovat nebezpečná napětí, jejichž velikost je dána velikostí poruchového proudu a vlastní impedancí PEN vodiče [2].



Obr. 2-7 – Porucha na VN straně [2]

Při návrhu zemnicí soustavy je varianta společné soustavy VN a NN preferována.

### 2.2.2 Oddělená uzemňovací soustava

Při zřizování oddělené zemnicí soustavy je nutno dbát na bezpečnost tak, aby nedošlo následkem poruchy k ohrožení osob nebo zařízení. Bezpečná vzdálenost pro oddělení zemničů je 20 m. Za určitých podmínek lze tuto vzdálenost snížit, například zvýšením rezistivity předpokládané cesty zemního proudu a odstraněním všech náhodných zemničů. Rozborem nebezpečných stavů v případě oddělených zemnicích soustav lze říci:

- 1) V případě poruchy na VN straně nevznikají u odběratelů žádná nebezpečná dotyková ani kroková napětí.
- 2) Při narušení izolace (nejčastěji na NN části transformátoru) vzniká trvalý nebezpečný stav na neživých částech uvnitř celé elektrické stanice.

Mimo tato rizika mohou být vlivem výstavby v okolí transformovny položeny další strojené či náhodné zemniče. Tím může být narušena bezpečná vzdálenost, často bez vědomí provozovatele distribuční sítě. Právě tyto situace jsou důvodem upřednostňování společné zemnicí soustavy [2].

## 2.3 Konstrukce nepoužívanějších typů zemnicích soustav

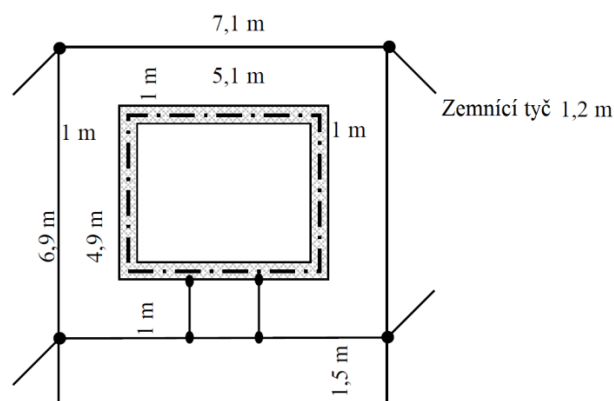
Prvky soustavy vysokého napětí jsou myšleny objekty trafostanic, úsekové odpínače, odpojovače, stožárové konzole apod. Každé jednotlivé zařízení či prvek musí být patřičně uzemněn.

Některé následující konstrukce budou provedeny jako modely. Výpočet zemního odporu u těchto vybraných soustav je proveden v kapitole 5. Veškerý popis zemniců včetně nákresů vychází z [3].

### 2.3.1 Kiosková zděná transformovna 22/0,4 kV s betonovým základem

Celá zemnicí soustava u této trafostanice je tvořena obvodovým zemničem v kombinaci se čtyřmi zemnicími tyčemi. Jak můžeme vidět na Obr. 2-8, každá tyč je dlouhá 1,2 m, vzdálenost mezi obvodovým zemničem a vnější stěnou je 1 m. Hloubka uložení obvodové zemnicí elektrody je 0,7 m. Šířka zdi trafostanice je 0,3 m a základový zemnič je veden přímo středem po celém jejím obvodu. Vnější rozměry základu jsou  $a = 4,9$  m a  $b = 5,1$  m.

Na obvodový zemnič navazuje ekvipotenciální práh uložený 1,5 m od obvodového zemniče u vchodu do trafostanice.



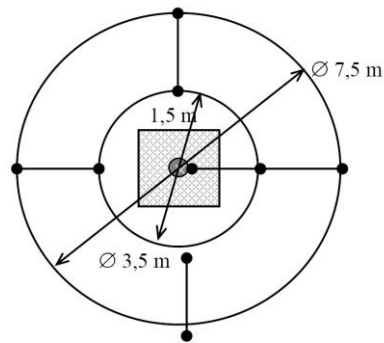
Obr. 2-8 – Zemnicí soustava kioskové zděné transformovny 22/0,4 kV s betonovým základem [3]

### 2.3.2 Stožárová jednosloupová transformovna 22/0,4 kV na betonovém sloupu (platí i pro příhradové TS)

Celá zemnicí soustava je tvořena železobetonovým základem doplněným o strojený zemnič. Rozměry základu betonového sloupu jsou přibližně 1,5 x 1,5 m a je uložen v hloubce  $L_p = 2,2$  m. Průměr sloupu je  $D_p = 0,365$  m měřeno v úrovni zemského povrchu. Veškeré následně popsané strojené zemniče jsou tvořeny z FeZn pásků 30x4 mm.

#### 2.3.2.1 Dva ekvipotenciální kruhy

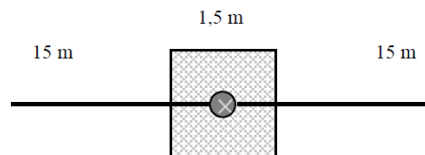
Jako první variantu jsme zvolili dva ekvipotenciální kruhy. Konkrétní konfigurace je znázorněna na Obr. 2-9. Vnitřní kruh je uložen v hloubce 0,4 m a vnější 0,7 m pod zemí.



Obr. 2-9 – Strojený zemnič ve formě dvou ekvipotenciálních kruhů [3]

### 2.3.2.2 Dva zemnicí pásky

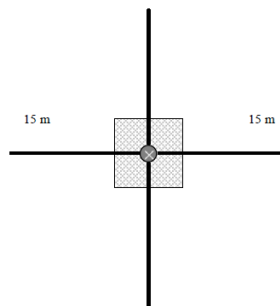
V druhém případě bude zemnicí soustava tvořena dvěma FeZn pásky, jak je naznačeno na Obr. 2-10. Délka každého pásku je 15 m.



Obr. 2-10 – Strojený zemnič ve formě dvou zemnicích pásků [3]

### 2.3.2.3 Čtyři zemnicí pásky

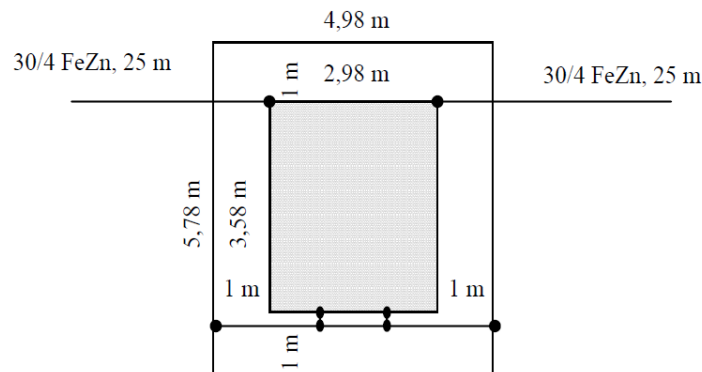
Posledním případem je zemnicí soustava tvořená čtyřmi pásky FeZn dlouhými 15 m. Celá konfigurace je znázorněna na Obr. 2-11.



Obr. 2-11 – Strojený zemnič ve formě čtyř zemnicích pásků, modifikováno z [3]

### 2.3.3 Kiosková bloková transformovna 22/0,4 kV

Rozměry trafostanice a zemnicí soustavy jsou zobrazeny na Obr. 2-12. Celá stanice je situována na štěrkové vyrovnávací vrstvě. Jedná se o kombinaci obvodového zemniče a dvou zemnicích pásků, které jsou uloženy v kabelové trase.

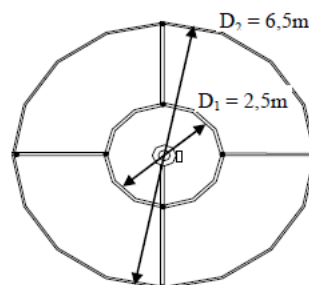


Obr. 2-12 – Zemnicí soustava kioskové blokové trafostanice [3]

### 2.3.4 Příklad uzemnění úsekového odpínače

V tomto konkrétním případě budeme uvažovat konkrétní odpínač napájený z rozvodny Písek transformátorem T 102. Jedná se o odpínač na venkovním vedení.

Celá zemnicí soustava se sestává ze dvou ekvipotenciálních kruhů, viz Obr. 2-13 (dvojitý obvodový zemnič). Pro propojení obou kruhů je použito FnZn pásků, jak je znázorněno na tomtéž obrázku.



Obr. 2-13 – Uzemnění úsekového odpínače pomocí dvou ekvipotenciálních kruhů [3]

## 2.4 Materiály používané ke konstrukci zemničů

V této kapitole jsou zmíněny dva základní a nejpoužívanější materiály pro konstrukci zemničů z předchozí kapitoly. Prvním z nich je pásek FeZn 30x4 mm, který je používán v každém zmíněném provedení, druhým je pak zemnicí tyč. Popis materiálů, jejich použití a nákresy vycházejí z [3].

### 2.4.1 Pásek FeZn 30x4 mm

Pásek FeZn se nejčastěji používá pro uzemnění elektrických zařízení a konstrukci hromosvodů nebo k rozvodu elektrické energie v elektrickém zařízení. Materiál (s povrchovou ochranou žárovým zinkováním) je vhodný jak pro instalaci po povrchu podpěrných bodů, tak i pro uložení v zemi.



### 3 POŽADAVKY NA ZEMNÍ SOUSTAVY

Požadavky na uzemnění jsou dány především s ohledem na ochranu lidí a zvířat před úrazem elektrickým proudem. K tomu dochází při dotyku neživých částí, které mohou být v případě poruchy pod napětím. Ochrana zde zajišťuje odpojení nebo snížení dotykového a krokového napětí na bezpečnou úroveň. Při dimenzování uzemnění jsou rozhodující parametry velikost poruchového proudu, doba trvání poruchy a vlastnosti půdy daného místa [4].

#### 3.1 Zemní odpor a rezistivita půdy

Hodnota rezistivity půdy značně kolísá v závislosti na konkrétním místě. Faktorů ovlivňujících její velikost je celá řada – složení půdy, její struktura, vlhkost apod. Orientační hodnoty pro určité typy půdy jsou uvedeny v Tab. 3-1.

Tab. 3-1 – Orientační hodnoty rezistivity pro různé typy půd [5]

Typ půdy	Rezistivita půdy [ $\Omega\text{m}$ ]
močál	5 - 40
hlína, jíl, humus	20 - 200
písek	200 - 2 500
štěrkopísek	2 000 - 3 000
zvětralá skála	do 1 000
pískovec	2 000 - 3 000
žula	až do 50 000
moréna	až do 30 000

Zemní odpor zemniče  $R_E$  je závislý na rezistivitě půdy a na rozměrech a typu zemniče, více závisí na jeho celkové délce než průměru [5].

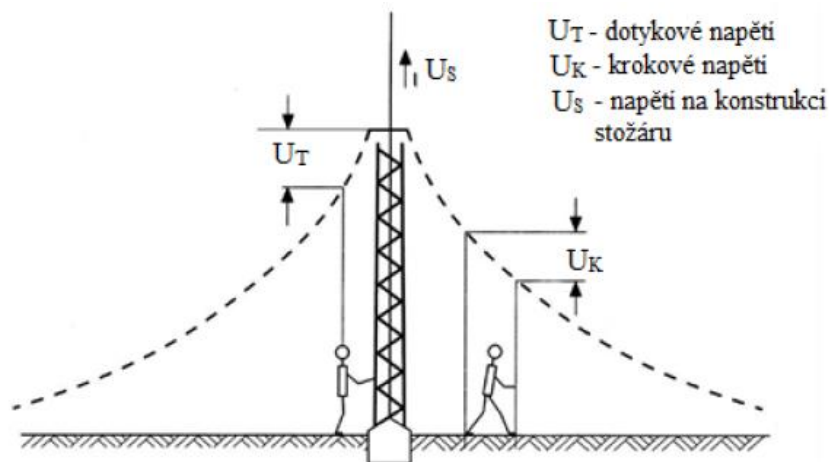
#### 3.2 Dotyková a kroková napětí

ČSN EN 50522 definuje dotykové napětí  $U_T$  jako: „*napětí mezi vodivými částmi, kterých se člověk nebo zvíře dotýká současně.*“ Krokové napětí  $U_K$  je stejnou normou definováno jako: „*napětí mezi dvěma body zemského povrchu vzdálených od sebe 1 m, což je považováno za délku jednoho kroku člověka.*“ Dotykové a krokové napětí je znázorněno na Obr. 3-1.

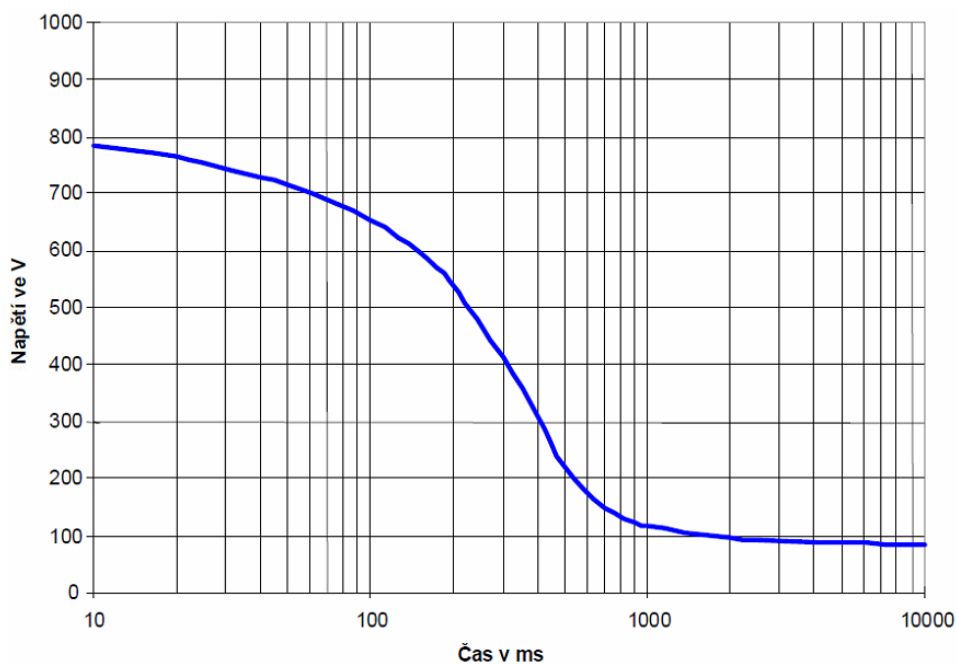
Lidské zdraví ohrožuje proud, protékající lidským tělem, který je těmito napětími vyvolán. Z tohoto důvodu jsou určovány dovolené hodnoty dotykového napětí. Dle [5] jsou tyto hodnoty definovány jako: „*napětí, které se připouští na lidském těle po dobu trvání poruchy  $t_F$  a které zaručuje bezpečnost osoby.*“. Dovolené hodnoty dotykového napětí v závislosti na čase působení zle odečíst z Obr. 3-1. Tato závislost však představuje konkretizovanou situaci, kdy k doteku dochází pouze dvěma holýma rukama nebo dotyk ruka-noha. Nejsou zde uvažovány žádné přidavné impedance, jako například podrážky bot. Uvedená závislost uvádí dovolená dotyková napětí při zemních poruchách v sítích nad 1 kV.

Vlivem automatického nebo ručního odpojení poruchy nevznikají jako následek poruchy neomezeně dlouho trvající dotyková napětí. Déle trvající poruchou je např. zemní spojení trvající řádově i několik minut. Zde má však poruchový proud relativně nízkou úroveň. Pro dobu trvání poruchy  $t_F$  delší než 5 s je maximální dovolená dotyková napětí  $U_{Tp}$  stanoveno na hodnotu 80 V.

Pro kratší doby trvání poruchy vycházíme z Obr. 3-2. Pro kroková napětí nejsou stanoveny žádné limitní hodnoty [5].



Obr. 3-1 – Znázornění dotykového a krokového napětí v závislosti na rozložení potenciálu na povrchu země [5]

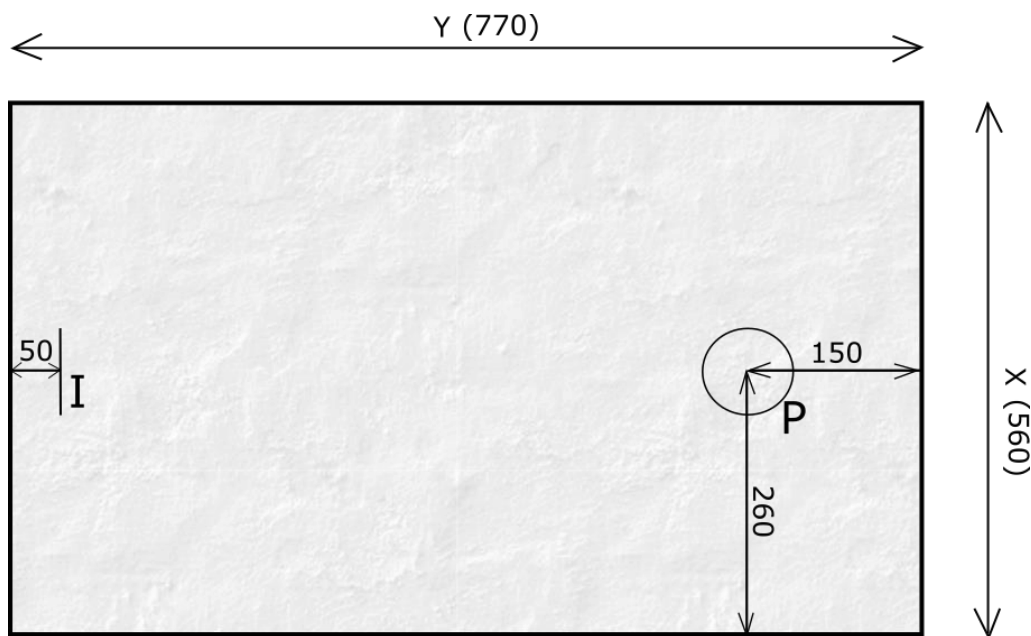


Obr. 3-2 – Dovolené hodnoty dotykového napětí [5]

Při dimenzování zemnicí soustavy je pak brán ohled ještě na mechanickou a korozní odolnost zemnice a jeho proudovou zatížitelnost. Tato problematika však není předmětem práce, proto uvádíme pouze výše zmíněné.

## 4 KONSTRUKCE MODELU

Uvažujeme-li o modelu jako o celku, tedy hotovém výrobku, je třeba jej rozdělit na dvě části. První z nich je samotná nádoba se směsí granátového písku a grafitu, kterou se zabývá tato kapitola. Druhou částí jsou pak samotné modely zemnicích soustav, na kterých bude prováděno měření. Před jeho začátkem je však třeba stanovit parametry půdy tak, aby byly v průběhu měření stále konstantní. Nejdůležitějším z těchto parametrů je pak rezistivita půdy [5].



Obr. 4-1 – Schéma modelu, rozměry jsou udávány v mm

Na Obr. 4-1 je znázorněna nádoba, jedná se o rozměry vnitřní, dále je zde zakreslena pozice elektrod při měření rozložení potenciálu, ta byla při všech měřeních zachována. Jako elektrodu pro injektáž proudu I jsme použili kovový pásek umístěný 5 cm od kraje nádoby. V pravé části byl vždy střed měřeného zemniče P založen dle nákresu.

Ideální elektrodou pro injektáž proudu (I) pak bude taková, která bude mít co nejmenší zemní odpor. Lze použít například dva pásy, každý o délce 20 cm. Jedná se o to, aby bylo navýšení potenciálu této elektrody co nejmenší. Navýšení (nárůst) potenciálu zemniče je „napětí mezi uzemňovací soustavou a referenční zemí [5].“

### 4.1 Složení a rezistivita půdy

Použitá půda je směsí grafitu a granátového písku používaného k řezání vodním paprskem. Jedná se o písek, který už byl použit, proto obsahuje drobné části železa a oceli. Směs je namíchána tak, abychom mohli injektovat proud  $I_e$  o velikosti 0,5 A při napětí ideálně do 200 V. Toho bylo dosaženo při rezistivitě půdy  $\rho_{Em}$  1640  $\Omega\text{cm}$ . Při návrhu bylo také třeba zohlednit velikost proudu. Při proudech vyšších (okolo 1 A) docházelo k rychlému ohřevu půdy a především zemniče. Po odpojení napětí hrozilo popálení, a proto bylo za referenční hodnotu vybráno 0,5 A. Dalším kritériem bylo napětí, které muselo být dostatečně velké k tomu, abychom mohli měřit rozložení potenciálu na povrchu země. Při zvolené rezistivitě pak byly obě tyto podmínky splněny.

## 4.2 Vlhkost

V reálném prostředí má půda vždy nějakou vlhkost a právě průchodem zemního proudu místem poruchy dochází k jejímu vysychání. Stejně tomu je i v případě našeho modelu, zde se však snažíme simulovat konstantní podmínky a zmíněná vlhkost půdy je tedy nežádoucí. V případě navlhčení půdy dochází v oblasti zemnicí elektrody při měření k velice rychlému vysychání, které následně výsledky měření ovlivňuje. Jde především o snížení kontaktní plochy elektrody s půdou a tedy velkému navýšení zemního odporu a poklesu proudu místem poruchy. Vlivem této nehomogenity, jelikož půda schne v každém směru jinak, dochází i k deformaci očekávaného rozložení pole a úbytku elektrického potenciálu. Z těchto důvodů je nutno měření provádět pouze za sucha.

## 5 POUŽITÉ MODELY ZEMNIČŮ A JEJICH ZEMNÍ ODPOR

Tato kapitola se zabývá výpočtem zemního odporu modelů zemničů a jejich prezentací ve fotografické podobě. V každé podkapitole je také uveden zemní odpor reálného zemniče s uvažovanými rozměry v metrech uloženého v půdě o rezistivitě  $100 \Omega\text{m}$ . Vzorce pro výpočet zemních odporů vycházejí z [3].

### 5.1 Polokulový zemnič

Přechodový zemní odpor kovové kulové elektrody o poloměru  $r$ , zapuštěné hluboko pod povrchem v homogenní půdě o rezistivitě  $\rho_E$  je

$$R_{EK} = \frac{\rho_E}{4\pi r}, \quad (5.1)$$

kde  $r$  je poloměr kulové elektrody.



Obr. 5-1 – Model polokulové elektrody

Pokud uvažujeme pouze polokulový zemnič, tedy pouze polovinu koule, umístěný v rovině s povrchem, je výsledný odpor dvojnásobný

$$R_{Epo} = \frac{\rho_E}{2\pi r} \quad (5.2)$$

V našem modelu představuje polokulový zemnič klobouková matice (Obr. 5-1) o průměru  $d = 2,256 \text{ cm}$ . Se znalostí rezistivity půdy pak můžeme vypočítat zemní odpor

$$R_{Epo} = \frac{\rho_{Em}}{2\pi r} = \frac{1640}{\pi \cdot 2,256} = 231,4 \Omega \quad (5.3)$$

Reálný zemnič tohoto typu by měl zemní přechodový odpor  $14,11 \Omega$ .

### 5.2 Zemnicí tyč

Model zemniče ve tvaru tyče vytvořený dle Obr. 2-15, je vyroben ze tří měděných drátů o průměru  $d = 1,68 \text{ mm}$ . Délka tyče  $L$  je  $2 \text{ cm}$ , zapuštěná do země tak, aby její horní hrana splývala s povrchem půdy. Zemní odporu poté počítáme jako

$$R_{Et} = \frac{\rho_{Em}}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d} = \frac{1640}{2\pi \cdot 2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2}{0,345} = 410,3 \Omega \quad (5.4)$$



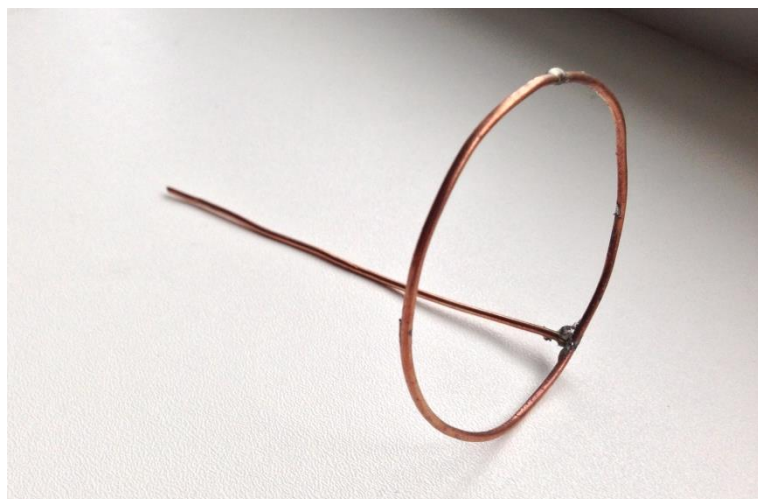
Obr. 5-2 – Model zemnicí tyče

Reálný zemnič tohoto typu by měl zemní přechodový odpor 25,02  $\Omega$ .

### 5.3 Jeden ekvipotenciální kruh

Pro výrobu tohoto zemniče byl použit měděný drát o průměru  $d = 1,68$  mm. Průměr kruhu  $D$  je 6 cm.

$$R_{E1k} = \frac{\rho_{Em}}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{2\pi \cdot D}{d} = \frac{1640}{\pi^2 \cdot 6} \cdot \ln \frac{2\pi \cdot 6}{0,168} = 149,94 \Omega \quad (5.5)$$



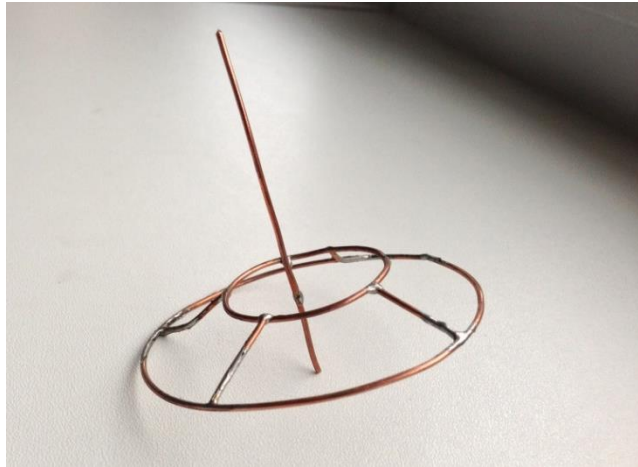
Obr. 5-3 – Model ekvipotenciálního kruhu

Reálný zemnič tohoto typu by měl zemní přechodový odpor 9,14  $\Omega$ .

### 5.4 Dva ekvipotenciální kruhy

Model tohoto typu zemniče je vyroben na základě nákresu z Obr. 2-9, z měděného drátu o průměru 1,31 mm. Průměr vnitřního kruhu je 3,5 cm a je uložen v hloubce 0,4 cm. Vnější kruh má průměr 7,5 cm a jeho hloubka založení je 10,19 mm. Při stanovení zemního odporu dvou

ekvipotenciálních kruhů se potupuje obdobně jako v předchozím případě. Provede se tedy výpočet odporů jednotlivých kruhů.



Obr. 5-4 – Model dvou ekvipotenciálních kruhů

Pro vnitřní kruh

$$R_{E1kv} = \frac{\rho_{Em}}{\pi^2 \cdot D} \ln \frac{2\pi \cdot D}{d} = \frac{1640}{\pi^2 \cdot 3.5} \ln \frac{2\pi \cdot 3.5}{0,131} = 243,23 \, \Omega \quad (5.6)$$

Pro vnější kruh

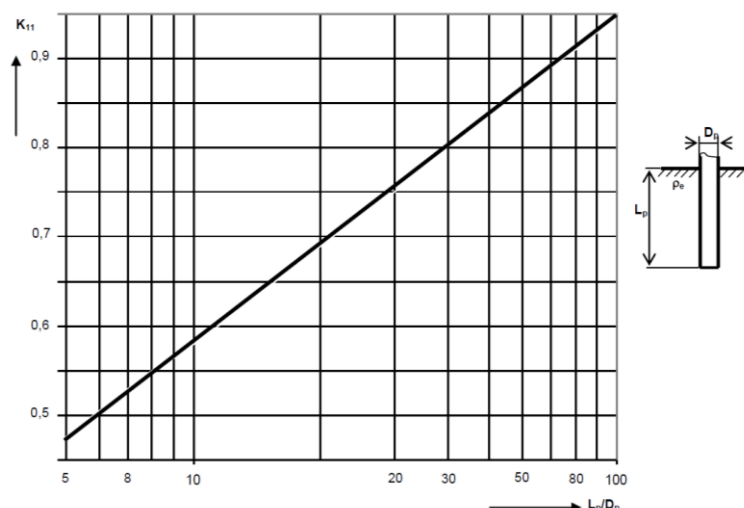
$$R_{E1kvn} = \frac{\rho_{Em}}{\pi^2 \cdot D} \ln \frac{2\pi \cdot D}{d} = \frac{1640}{\pi^2 \cdot 7.5} \ln \frac{2\pi \cdot 7.5}{0,131} = 130,39 \, \Omega \quad (5.7)$$

Oba tyto odpory poté sečteme (jedná se o paralelní zapojení)

$$R_{E2k} = \frac{R_{E1kv} \cdot R_{E1kvn}}{R_{E1kv} + R_{E1kvn}} = \frac{243,23 \cdot 130,39}{243,23 + 130,39} = 84,89 \, \Omega \quad (5.8)$$

Jelikož se jedná o model reálné zemnicí soustavy, je zde uvažován i zemní odpor základového zemniče stožáru. Hloubka uložení základu je  $L_p = 2,2$  cm, průměr základu je  $D_p = 1,31$  mm. Tyto údaje jsou nutné pro stanovení koeficientu  $K_{11}$  z Obr. 5-5.

$$\frac{L_p}{D_p} = \frac{2,2}{0,131} = 16,79 \Rightarrow K_{11} = 0,7 \quad (5.9)$$



Obr. 5-5 – Koeficient  $K_{11}$  pro ocelovou výztuž pilotového základu nebo základu stožáru [3]

$$R_{st} = 1.1 \cdot K_{11} \cdot \frac{\rho_{Em}}{L_p} = 1.1 \cdot 0.7 \cdot \frac{1640}{2.2} = 574,06 \, \Omega \quad (5.10)$$

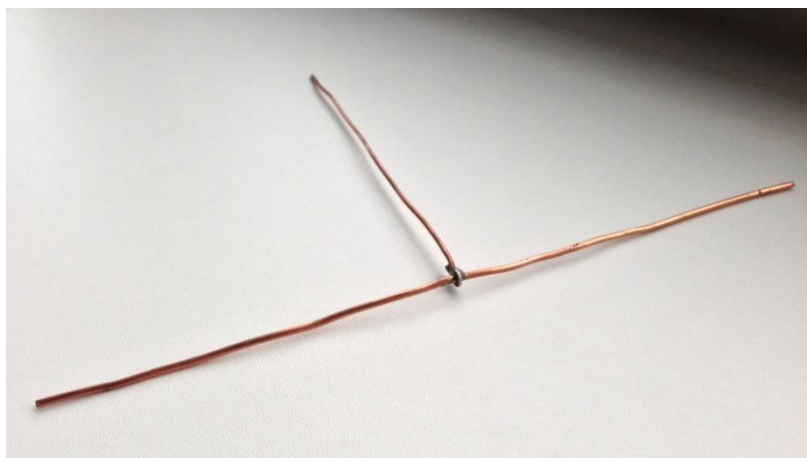
V posledním kroku teď spočteme zemní odpor celé zemnicí soustavy. Jedná se opět o paralelní spojení

$$R_{EV} = \frac{R_{st} \cdot R_{E2k}}{R_{st} + R_{E2k}} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{574,06 \cdot 84,89}{574,06 + 84,89} \cdot \frac{1}{0.75} = 98,61 \, \Omega, \quad (5.11)$$

kde koeficient  $\eta$  reprezentuje využití jednotlivých částí zemnicí soustavy, pro malé trafostanice používáme hodnotu přibližně  $\eta = 0,75$  [3]. Reálný zemnič tohoto typu by měl zemní přechodový odpor  $6,01 \, \Omega$ .

## 5.5 Dva zemnicí pásy

Model zemnicí soustavy v podobě dvou zemnicích pásků je zhotoven na základě Obr. 2-10. Jediným rozdílem oproti nákresu je délka jednotlivých pásků. Vzhledem k omezené velikosti nádoby se směsí je délka  $L$  jednotlivých částí 10 cm. Na výrobu byl použit měděný drát o průměru  $d = 1,68 \, \text{mm}$ .



Obr. 5-6 – Model dvou zemnicích pásků

Zemní odpor jednoho pásku je

$$R_{Ep} = \frac{\rho_{Em}}{\pi L} \ln \frac{2L}{d} = \frac{1640}{\pi \cdot 10} \ln \frac{2 \cdot 10}{0,168} = 249,5 \Omega \quad (5.12)$$

Pro zemní odpor  $n$  pásků platí

$$R_{Epn} = \frac{R_{Ep}}{n} \cdot \frac{1}{\eta_{pn}} = \frac{249,5}{2} \cdot \frac{1}{1} = 124,76 \Omega \quad (5.13)$$

Koeficient využití  $\eta_{pn}$  závisí na počtu použitých zemních pásků a určíme jej z Tab. 5-1.

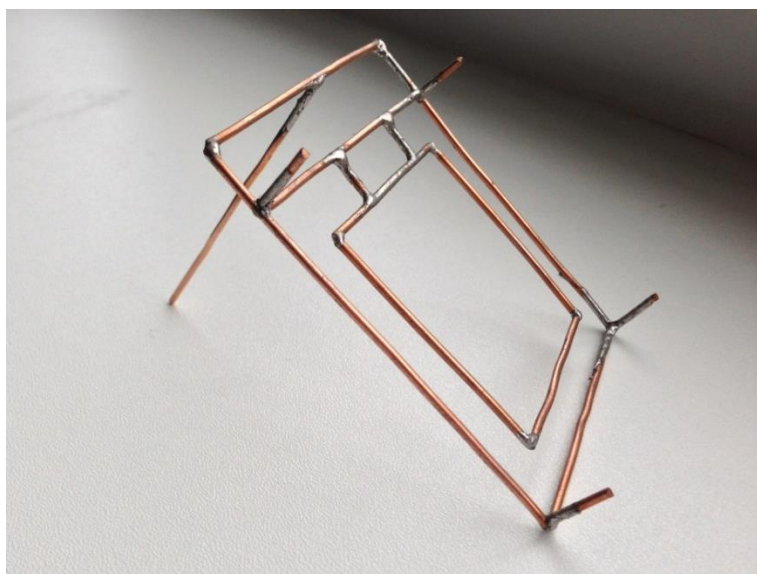
Tab. 5-1 – Koeficient využití  $\eta_{pn}$  v závislosti na počtu použitých pásků [3]

Počet pásků	Koeficient využití	Poznámka
$n$ [-]	$\eta_{pn}$ [-]	-
1 nebo 2	1.000	-
3	0.900	Úhel mezi 1. a 2. páskem je 135° a mezi 2. a 3. je 90°
4	0.836	Jednotlivé pásky mezi sebou svírají úhel 90°

Reálný zemnič tohoto typu by měl zemní přechodový odpor 7,61  $\Omega$ .

## 5.6 Model zemnicí soustavy zděné kioskové transformovny

Tento model je zhotoven na základě Obr. 2-8. Vzhledem ke složitosti této zemnicí soustavy bude výpočet celkového zemního odporu složen z několika dílčích kroků. V některých částech textu je tento typ zemniče označen jako „Zemnič 1,“ aby nebylo nutno stále opisovat jeho dlouhý název.



Obr. 5-7 – 5.6 Model zemnicí soustavy zděné kioskové transformovny

Zemní odpor základového zemniče vypočítáme jako:

$$R_{Ez} = \pi \frac{\rho_{Em}}{4 \cdot (a + b)} = \frac{\pi \cdot 1640}{4 \cdot (5 + 5)} = 128,82 \Omega, \quad (5.14)$$

kde  $a$  a  $b$  jsou rozměry základu, viz Obr. 2-8. V případě našeho modelu jsou rozměry  $a$  a  $b$  stejné a to 5 cm, jelikož není vyroben s milimetrovou přesností.

Obvodový zemnič je tvořen měděným vodičem o poloměru  $d = 1,68$  mm. Pro stanovení zemního odporu je třeba nejdříve určit ekvivalentní průměr pomyslného zemnicího kruhu  $D_{ekv}$ :

$$D_{ekv} = \frac{2 \cdot (a + b)}{\pi} = \frac{2 \cdot (7 + 8.5)}{\pi} = 9.87 \text{ cm} \quad (5.15)$$

Nyní určíme hodnotu zemního odporu obvodového zemniče pomocí vzorce (5.5)

$$R_{E1k} = \frac{\rho_{Em}}{\pi^2 \cdot D} \ln \frac{2\pi \cdot D}{d} = \frac{1640}{\pi^2 \cdot 9.87} \ln \frac{2\pi \cdot 9.87}{0.168} = 99,54 \Omega \quad (5.16)$$

Poslední částí soustavy jsou zemnicí tyče. Každá z nich má délku  $L = 1,2$  cm a je vyrobena z téhož drátu. Vzdálenost mezi jednotlivými tyčemi je 7 cm. Dle vzorce (5.4) pro jednu tyč platí:

$$R_{Et} = \frac{\rho_{Em}}{2\pi \cdot L} \ln \frac{4L}{d} = \frac{1640}{2\pi \cdot 1.2} \ln \frac{4 \cdot 1.2}{0.168} = 729,19 \Omega \quad (5.17)$$

V následujícím kroku spojíme všechny části jedné zemnicí soustavy dohromady. Nejdříve kombinace zemnicích tyčí a obvodového zemniče:

$$\frac{a}{L} = \frac{7.0}{1.2} = 5.8 \quad (5.18)$$

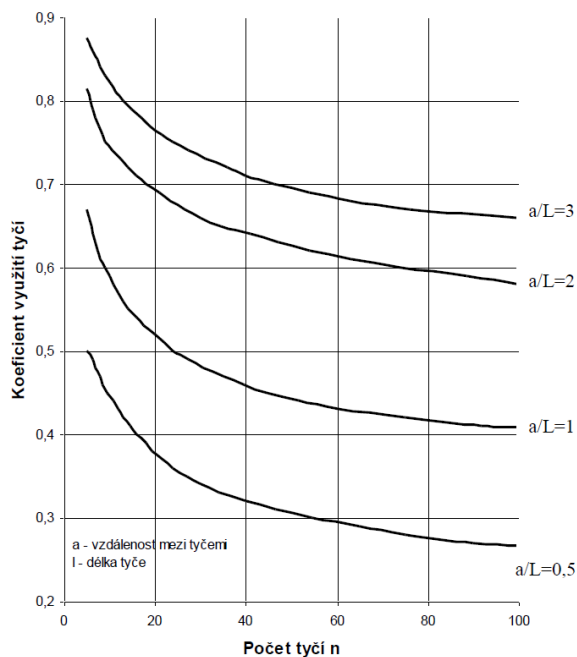
Z této hodnoty a počtu zemnicích tyčí ( $n = 4$ ) určíme hodnotu koeficientu  $\eta_1$  z Obr. 5-8.

$$R_{Eo} = \frac{1}{\frac{0.9 \cdot \eta_1 \cdot n}{R_{Et}} + \frac{1}{R_{E1k}}} = \frac{1}{\frac{0.9 \cdot 0.9 \cdot 4}{729,19} + \frac{1}{99,54}} = 69,01 \Omega \quad (5.19)$$

Výslednou hodnotu zemního odporu spočítáme jako kombinaci základového zemniče a obvodového zemniče doplněného zemnicími tyčemi:

$$R_E = \frac{R_{Ez} \cdot R_{Eo}}{R_{Ez} + R_{Eo}} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{128,82 \cdot 69,01}{128,82 + 69,01} \cdot \frac{1}{0.75} = 59,92 \Omega \quad (5.20)$$

Koeficient  $\eta$  udávající využití jednotlivých částí zemnicí soustavy je pro tuto konfiguraci  $\eta = 0,75$ , jak uvádí [3]. Reálný zemnič tohoto typu by měl zemní přechodový odpor  $3,65 \Omega$ .



Obr. 5-8 – Koefficient využití tyčových zemničů v závislosti na poměru vzdálenosti mezi tyčemi a jejich délky [3]

## 5.7 Model zemničí soustavy kioskové blokové trafostanice

Posledním měřeným modelem je model zemničí soustavy kioskové blokové trafostanice, viz Obr. 2-12. Opět je oproti reálné konfiguraci modifikován, a to v provedení bez zemničních pásků. Zbývá tedy vypočítat pouze odpor obvodového zemniče. Postup je obdobný jako v předchozí kapitole. Ze stejného důvodu jako v předchozím případě budeme tento zemnič označovat jako: „Zemnič 2.“



Obr. 5-9 – 5.7 Model zemničí soustavy kioskové blokové trafostanice

Jako první se určí ekvivalentní poloměr  $D_{ekv}$  ze vzorce (5.15)

$$D_{ekv} = \frac{2 \cdot (5 + 6,8)}{\pi} = 7,51 \text{ cm} \quad (5.21)$$

Pro obvodový zemnič pak lze použít vzorec (5.5)

$$R_{E1k} = \frac{1640}{\pi^2 \cdot 7,51} \ln \frac{2\pi \cdot 7,51}{0,168} = 124,72 \, \Omega \quad (5.22)$$

Pro základový zemnič platí

$$R_{Ez} = \pi \frac{\rho_{Em}}{4 \cdot (a + b)} = \frac{\pi \cdot 1640}{4 \cdot (3 + 3,5)} = 198,16 \, \Omega \quad (5.23)$$

Výsledný odpor zemnicí soustavy určíme jako paralelní kombinaci  $R_{E1k}$  a  $R_{Ez}$

$$R_{EV} = \frac{124,72 \cdot 198,16}{124,72 + 198,16} = 76,54 \, \Omega \quad (5.24)$$

Reálný zemnič tohoto typu by měl zemní přechodový odpor  $7,32 \, \Omega$ .

## 6 MĚŘENÍ NA MODELU

Pro stanovení zemního odporu zemniče výpočtem je nutno znát rezistivitu půdy. Prvním měřením je tedy stanovení rezistivity půdy Wernerovou metodou (popsáno níže). Dále abychom byli schopni porovnat vypočtené hodnoty s hodnotami měřenými, je nutno změřit velikost zemního odporu zemnicí soustavy, v našem případě proudovou metodou, a v poslední řadě rozložení potenciálu.

### 6.1 Měření rezistivity půdy pomocí primárního testeru Omicron CPC 100

Měření rezistivity půdy na modelu bude uskutečněno pomocí Wernerovy metody. Principem této metody je injekce proudu do půdy pomocí dvou elektrod a sledování úbytku napětí mezi nimi. V našem případě jsou jako elektrody použity špendlíky, ležící na jedné přímce, zaražené v zemi do hloubky přibližně 0,7 cm. Mezi elektrodami je konstantní vzdálenost  $d$ . Poté můžeme podle vztahu (6.1) vypočítat rezistivitu  $\rho_e$ , jejíž jednotkou je  $\Omega\text{m}$ .

$$\rho_E = 2\pi \cdot d_W \cdot R_W \quad (6.1)$$

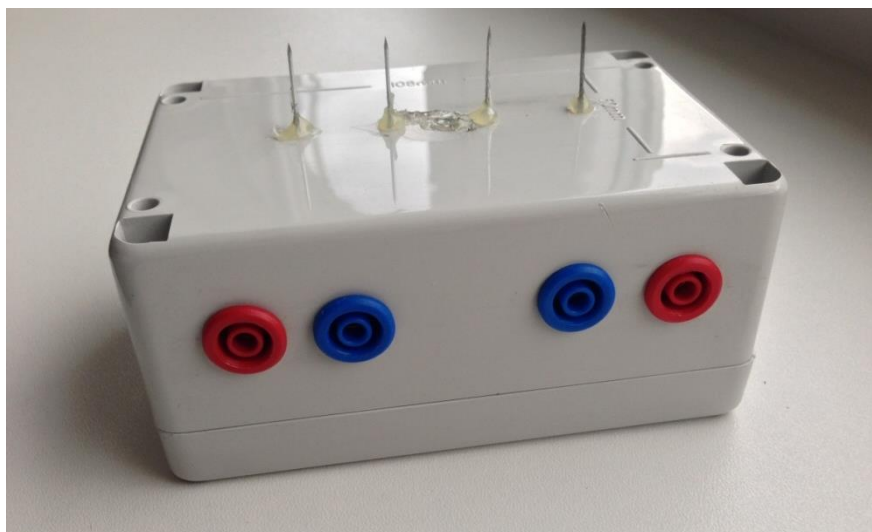
Tento vztah lze použít za následujících předpokladů:

- půda, na které je prováděno měření, je homogenní,
- hloubka uložení elektrody  $h$  činí přibližně 1/3 vzdálenost mezi elektrodami  $d$  [2].

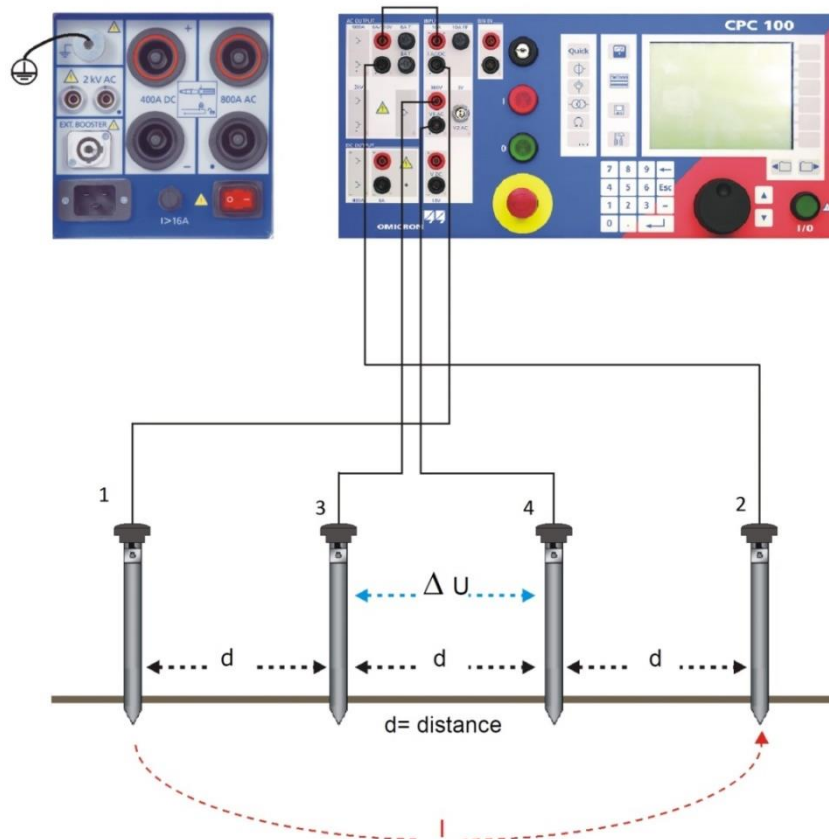
Hodnota odporu  $R$  je určena měřením pomocí primárního testeru Omicron CPC100. Jedná se o odpor vypočítaný dle Ohmova zákona, jako úbytek napětí  $\Delta U$  mezi vnitřními elektrodami při proudu  $I$  tekoucím mezi vnějšími elektrodami.

$$R = \frac{\Delta U}{I} \quad (6.2)$$

Výslednou hodnotu rezistivity vypočtenou na základě tohoto měření budeme považovat za směrodatnou při výpočtu zemního odporu zemničů.

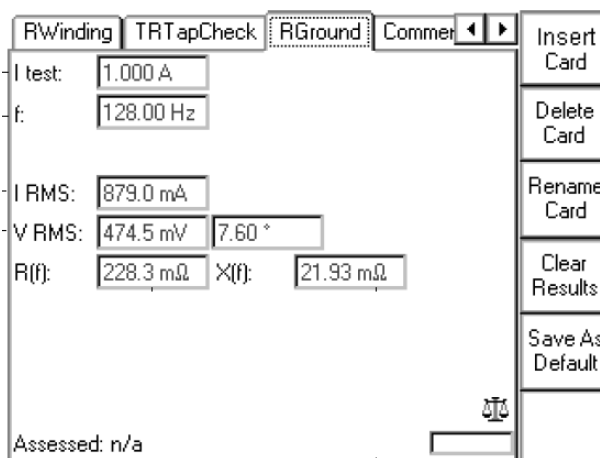


Obr. 6-1 – Přípravek pro měření rezistivity půdy



Obr. 6-2 – Schéma zapojení Omicron CPC 100 pro měření rezistivity půdy [6]

Schéma zapojení pro měření rezistivity půdy je znázorněno na Obr. 6-2. V našem případě bude při měření vzdálenost  $d$  mezi elektrodami 2 cm. Na Obr. 6-1 je vyfocen přípravek pro měření rezistivity za použití přístroje Omicron CPC 100. Krajní elektrody (červené) představují elektrody pro injektáž proudu (na Obr. 6-2 jsou označeny čísly 1,2). Vnitřní elektrody (modré) jsou elektrody pro měření úbytku napětí  $\Delta U$  (elektrody 3,4 na tomtéž obrázku).



Obr. 6-3 – Nastavení Omicron CPC 100 pro měření rezistivity [6]

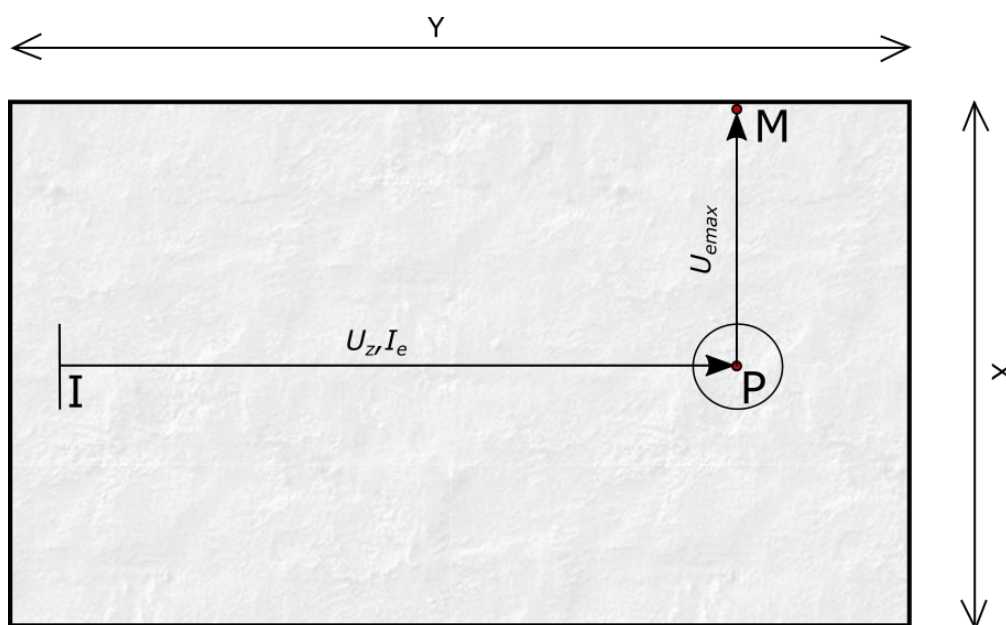
Po zapnutí přístroje Omicron CPC 100 nejdříve smažeme původní měření zvolením pole „Delete Card.“ Poté stiskem pole „Insert Card“ se objeví nabídka všech měření, kterými tento přístroj disponuje. Zde zvolíme složku „Resistance“ a v ní měření s názvem „RGround,“ tímto se

nám otevře stejná nabídka jako je na Obr. 6-3. Nyní nastavíme frekvenci, při které chceme rezistivitu půdy měřit a testovací proud. Při volbě frekvence může být použito i 50 Hz, jelikož neměříme v reálné síti a naše měření tedy nebude rušeno sítovou frekvencí. Jako testovací proud nastavujeme 0,5 A. Stiskem zeleného tlačítka zahájíme měření. Přístroj nám změří zemní odpor  $R_w$ , který dosadíme do (6.1) a vypočítáme rezistivitu půdy modelu  $\rho_{Em}$ .

## 6.2 Měření zemního odporu uzemnění – proudová metoda

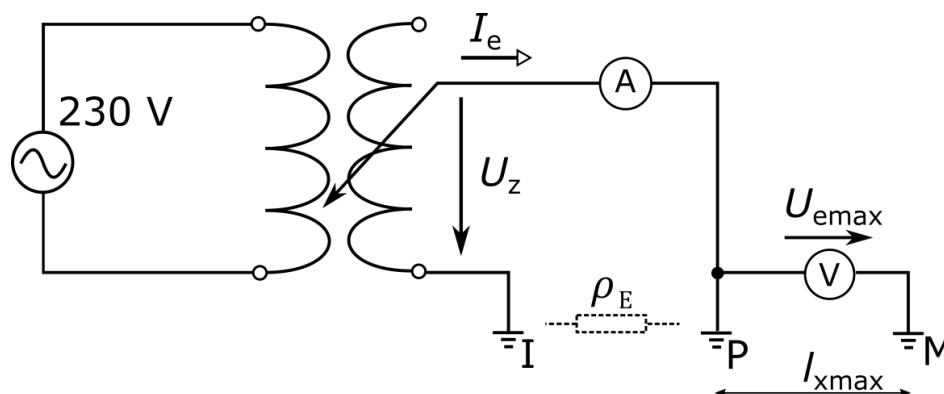
Zemní odpor soustavy určíme z Ohmova zákona za pomoci změřeného zemního proudu  $I_e$ , injektovaném elektrodou I a maximálního navýšení potenciálu zemniče  $U_{emax}$  měřenému kolmo na proudovodnou dráhu (mezi elektrodami P a M). Na Obr. 6-4 je znázorněno schéma měření. Úbytek napětí měříme v tomto případě na ose X. Zemní proud protéká na tuto osu v kolmém směru, tedy rovnoběžně s osou Y.

$$R_E = \frac{U_{emax}}{I_e} \quad (6.3)$$



Obr. 6-4 – Měření zemního odporu soustavy

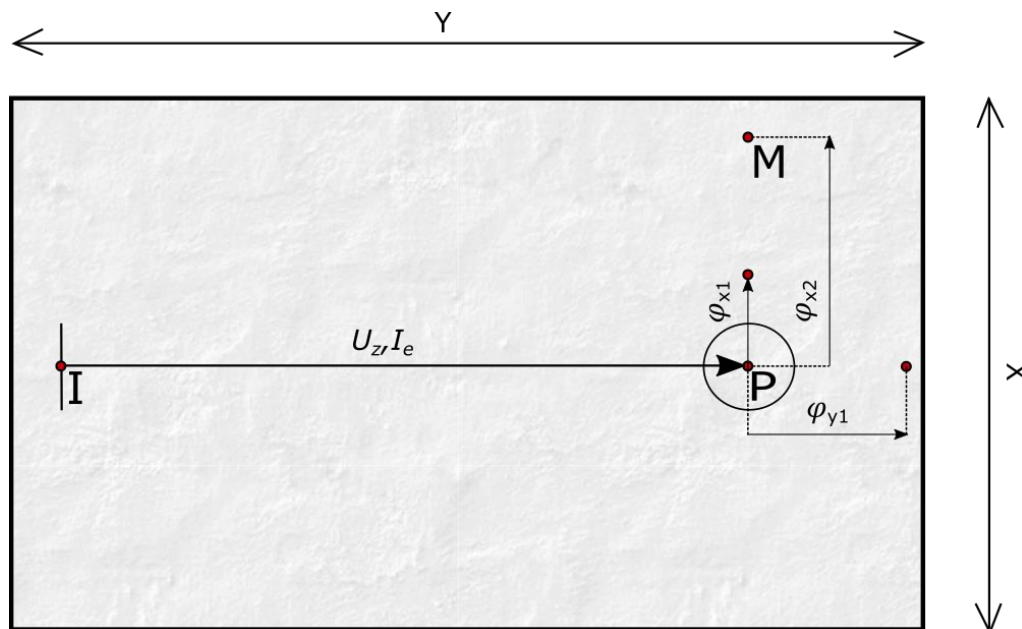
Na Obr. 6-5 je znázorněno elektrické schéma zapojení pro měření zemního odporu. Označení elektrod koresponduje s označením v nákreseu na Obr. 6-4.



Obr. 6-5 – Elektrické schéma zapojení měření zemního odporu soustavy

### 6.3 Měření rozložení potenciálu

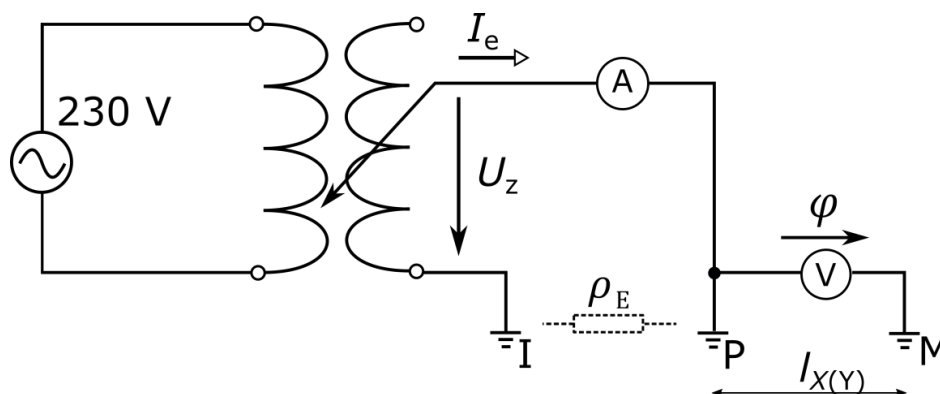
Měření rozložení potenciálu  $\varphi$  je znázorněno na Obr. 6-6. Zároveň elektrické schéma zapojení je znázorněno na Obr. 6-7. V tomto případě je měřeným parametrem  $\varphi$  a proměnou je  $I_X$  ( $I_Y$ ).



Obr. 6-6 – Měření rozložení potenciálu v osách X a Y

Rozložení potenciálu měříme v obou osách, abychom poté mohli z grafů porovnat chování zemniče v obou směrech, například jeho symetričnost. Jedna měřicí elektroda je vždy připojena na konkrétním zemniči (P) a druhou elektrodu (M) zapichujeme se zvolenou iterací dále od zemničí soustavy, postupně v obou osách. Rozložení potenciálu měříme vždy při zvoleném konstantním proudu  $I_e$ , injektovaném elektrodou I. V našem případě bylo zvoleno 0,5 A.

Místo uložení zemniče, respektive jeho střed, považujeme za počátek souřadnicové soustavy X, Y, tedy bod o souřadnicích [0,0].



Obr. 6-7 – Elektrické schéma měření rozložení potenciálu

## 7 MĚŘÍTKA

Aby bylo možno model využít k simulaci reálných zemnicích soustav, je třeba stanovit patřičná měřítko, tak aby hodnoty naměřené na modelu mohly být přepočítány na hodnoty skutečné.

### 7.1 Měřítko délky

Celý model je zhotoven v měřítku 1:100, tedy jeden centimetr na modelu reprezentuje jeden metr ve skutečnosti.

$$M_l = \frac{l_r}{l_m} = \frac{1}{0,01}, \quad (7.1)$$

kde  $l_r$  představuje skutečnou délku (vzdálenost) a  $l_m$  vzdálenost na modelu.

### 7.2 Odporové měřítko

Při určování měřítka odporu budeme vycházet z předpokladu, že se polokulová zemnicí elektroda bude chovat v podmínkách modelu úplně stejně jako tatáž elektroda se stejnými rozměry v metrech zasazená v půdě o rezistivitě  $100 \Omega\text{m}$ . Výpočet  $R_{\text{skut}}$  vychází ze vzorce (5.3) a měřený odpor  $R_m$  odečteme z Tab. 8-2.

$$M_R = \frac{R_{\text{skut}}}{R_m} = \frac{\frac{\rho_E}{2\pi r}}{163,2} = \frac{\frac{100}{2\pi \cdot 1,128}}{163,2} = 0,0864 \quad (7.2)$$

$$\frac{R_{\text{skut}}}{R_m} = 0,0864 \quad (7.3)$$

### 7.3 Měřítko napětí

Při stanovení měřítka napětí vyjdeme z maximální dovolené hodnoty dotykového napětí 80 V, která reprezentuje skutečnost. Na našem modelu je maximální hodnota dotykového napětí stanovena na 5 V. Tato hodnota byla zvolena jako referenční, protože se při ní rozsvěcuje LED dioda, která má být určena pro indikaci nebezpečných dotykových napětí.

$$M_U = \frac{U_{\text{skut}}}{U_{\text{sm}}} = \frac{80}{5} = 16 \quad (7.4)$$

### 7.4 Měřítko proudu

Měřítko proudu určíme z měřítka odporu a měřítka napětí dle Ohmova zákona

$$M_I = \frac{M_U}{M_R} = \frac{16}{0,0864} = 185,19 \quad (7.5)$$

### 7.5 Použití měřitek, ověření měřítka odporu

Po stanovení veškerých potřebných měřitek demonstrujeme použití pro konkrétní zemnic a to dva ekvipotenciální kruhy. Zároveň tak bude ověřena platnost měřítka odporu, které jsme

stanovili. Nejdříve spočítáme zemní přechodový odpor celé soustavy pro rezistivitu půdy  $100 \Omega\text{m}$ , tedy reálnou situaci. Vnitřní kruh má průměr 3,5 m a vnější kruh 7,5 m.

Postup výpočtu je stejný jako v kapitole 5. Dosazením do vzorce (5.6) získáme zemní odpor pro vnitřní kruh

$$R_{E1kv} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 3.5} \ln \frac{2\pi \cdot 3.5}{0.131} = 14,83 \Omega \quad (7.6)$$

Pro vnější kruh ze vzorce (5.7)

$$R_{E1kvn} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 7.5} \ln \frac{2\pi \cdot 7.5}{0.131} = 7,95 \Omega \quad (7.7)$$

Výsledný odpor obvodového zemniče ze vzorce (5.8)

$$R_{E2k} = \frac{14,83 \cdot 7,95}{14,83 + 7,95} = 5,18 \Omega \quad (7.8)$$

Základový zemnič (5.10)

$$R_{st} = 1.1 \cdot 0.7 \cdot \frac{100}{2.2} = 35 \Omega \quad (7.9)$$

Výsledný odpor zemnicí soustavy (5.11)

$$R_{EV} = \frac{35 \cdot 5,18}{35 + 5,18} \cdot \frac{1}{0.75} = 6,01 \Omega \quad (7.10)$$

Námi změřená hodnota zemního odporu modelu této zemnicí soustavy byla  $86,8 \Omega$ , viz Tab. 8-4. Přepočtem ze vzorce (7.2) dostaneme

$$R_{skut} = M_R \cdot R_{m\ddot{e}r} = 0,0864 \cdot 86,8 = 7,5 \Omega \quad (7.11)$$

Tímto je dokázáno, že na modelu lze simulovat reálné situace s relativně velkou přesností, jelikož odchylka od vypočítané hodnoty reálné soustavy činí pouze  $1,49 \Omega$ . Odchytky takto spočítaných hodnot pro všechny typy zemničů jsou uvedeny v Tab. 8-10.

Dále můžeme určit další reálné parametry přepočtem z hodnot naměřených na modelu. Pomocí měřítka napětí určíme skutečnou hodnotu navýšení potenciálu  $U_{eskut}$  dle vzorce (7.4) a hodnot z Tab. 8-4.

$$U_{eskut} = M_U \cdot U_{em\ddot{e}r} = 16 \cdot 43,4 = 694,4 \text{ V} \quad (7.12)$$

Dle (7.5) a hodnot ze stejné tabulky bude reálný zemní proud  $I_{eskut}$

$$I_{eskut} = M_I \cdot I_{em\ddot{e}r} = 185,9 \cdot 0,5 = 92,95 \text{ A} \quad (7.13)$$

## 8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Následující kapitola se zabývá porovnáním hodnot měřených a vypočítaných v kapitole 5 zemního odporu a dále prezentací rozložení potenciálu  $\varphi$  a krokového napětí  $U_s$  v blízkosti zemničů.

Při výpočtech a při vynášení dat do grafů považujeme hodnotu  $U_e$  ( $U_{\text{emax}}$ ) naměřenou v ose X za maximální. Zemní přechodový odpor zemniče  $R_e$  tedy určíme z Ohmova zákona jako

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} \quad (8.1)$$

Absolutní rozdíl  $\Delta R_e$  mezi měřenou a vypočtenou hodnotou je stanoven jako

$$\Delta R_e = |R_e - R_{\text{emeř}}| \quad (8.2)$$

Relativní rozdíl  $\Delta R_{e\%}$  je vypočítán jako

$$\Delta R_{e\%} = \frac{\Delta R_e}{R_e} \cdot 100 \quad (8.3)$$

Krokové napětí  $U_s$  je napětí mezi dvěma body vzdálenými od sebe 1 cm. Získáme ho z rozdílu potenciálů v těchto bodech

$$U_s = \varphi_{x1} - \varphi_{x2} \quad (8.4)$$

V případě, že body neleží od sebe ve vzdálenosti  $l_x$  právě 1 cm, vypočítáme krokové napětí jako podíl rozdílu potenciálů mezi těmito dvěma body a jejich vzdáleností.

$$U_s = \frac{\varphi_{x1} - \varphi_{x2}}{l_x} \quad (8.5)$$

Poměrné hodnoty krokového napětí  $U_{s\%}$  vypočítáme jako podíl krokového napětí a navýšení potenciálu daného zemniče

$$U_{s\%} = \frac{U_s}{U_e} \cdot 100 \quad (8.6)$$

Stejným způsobem vypočítáme i rozložení potenciálu v poměrných hodnotách  $\varphi\%$ .

Jelikož bylo rozložení potenciálu měřeno dle nákresu na Obr. 6-6, představovala vyšetřovaná soustava nulový potenciál. Je proto třeba stanovit korekci tak, aby bylo na zemniči napětí nejvyšší, jako ve skutečnosti. Tato oprava je následující:

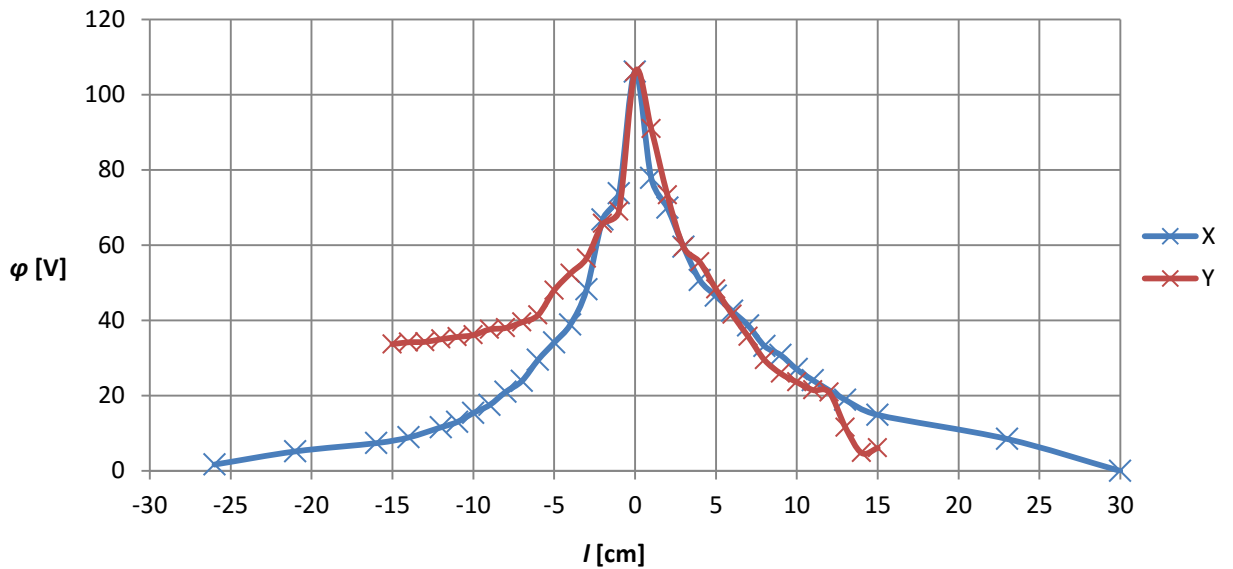
$$\varphi_k = |\varphi_{\text{původní}} - U_e| \quad (8.7)$$

Upravujeme tedy původní rozložení potenciálu o hodnotu  $U_e$ , tím dosáhneme stanoveného cíle a maximální potenciál bude na zemniči elektrodě. Na závislost krokových napětí nemá tato korekce žádný vliv, není tedy třeba tyto hodnoty korigovat. Veškeré naměřené hodnoty a grafy v poměrných hodnotách jsou uvedeny v příloze A. Dále prezentované hodnoty jsou korigované, pro přehlednost však zachováváme původní značení bez indexu „k.“

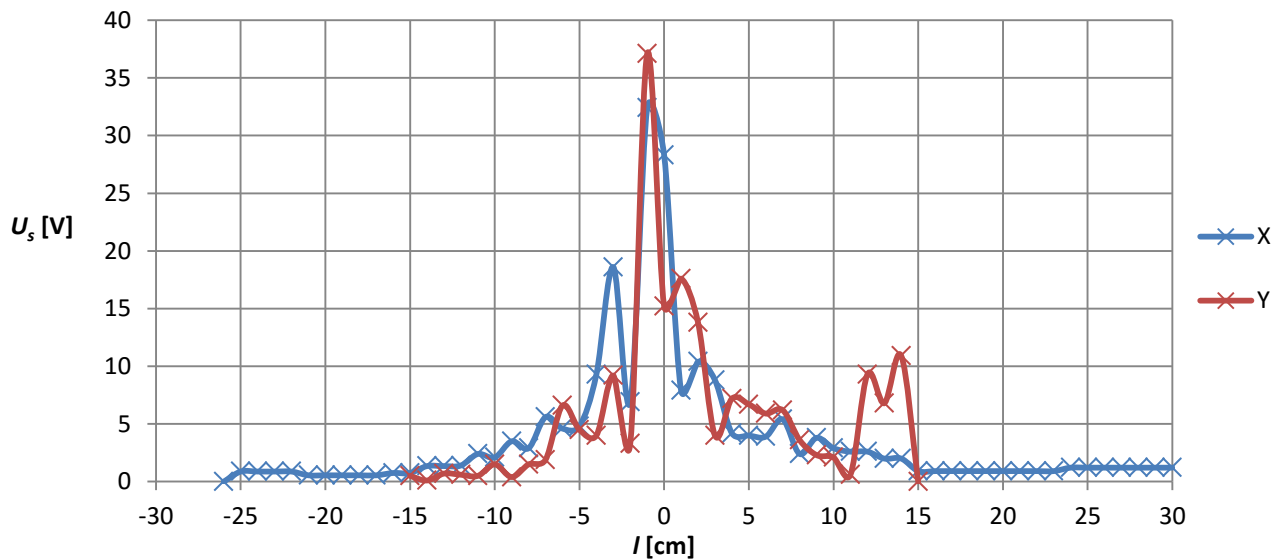
## 8.1 Tyčový zemnič

Tab. 8-1 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního odporu tyčového zemniče

$U_e$ [V]	$I_e$ [A]	$U_z$ [V]	$R_{emer}$ [ $\Omega$ ]	$R_e$ [ $\Omega$ ]	$\Delta Re$ [-]	$\Delta Re\%$ [%]
106.10	0.50	230.60	212.20	410.30	198.10	48.28



Obr. 8-1 – Rozložení potenciálu v okolí tyčového zemniče



Obr. 8-2 – Krokové napětí v okolí tyčového zemniče

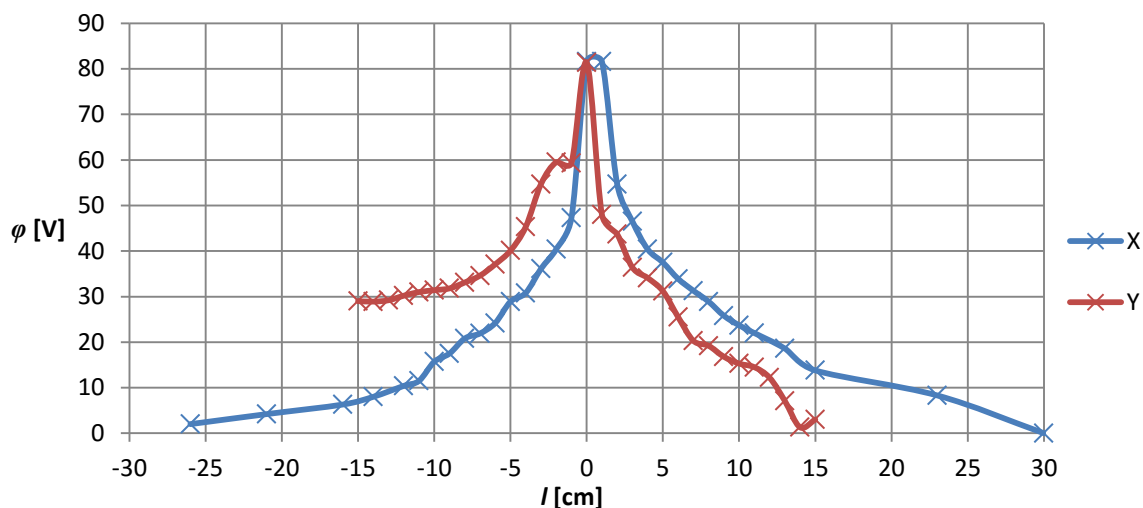
## 8.2 Polokulová zemničí elektroda

Samotná elektroda Obr. 5-1, tvořená kloboučkovou maticí má průměr přes 2 cm, tedy dvě hodnoty byly změřeny přímo na ní. Tím došlo k anomálii v grafu krokových napětí Obr. 8-4, kdy

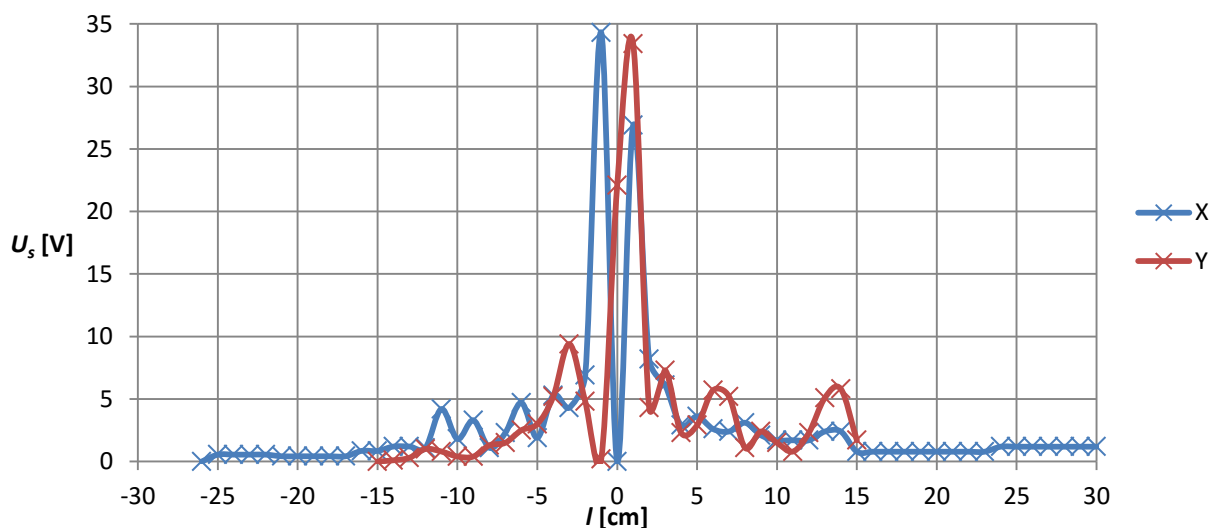
v bodě [0,0] je napětí nulové. V reálné situaci by však bylo na elektrodě dotykové napětí stejné jako v přechodném bodě. Případ znázorněný v grafu by nastal v situaci, kdy bychom na této elektrodě stáli a udělali krok.

Tab. 8-2 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního odporu polokulové zemnicí elektrody

$U_e$ [V]	$I_e$ [A]	$U_z$ [V]	$R_{emer}$ [ $\Omega$ ]	$R_e$ [ $\Omega$ ]	$\Delta Re$ [-]	$\Delta Re\%$ [%]
81.6	0.5	198.5	163.2	231.4	68.2	29.47



Obr. 8-3 – Rozložení potenciálu v okolí polokulové zemnicí elektrody

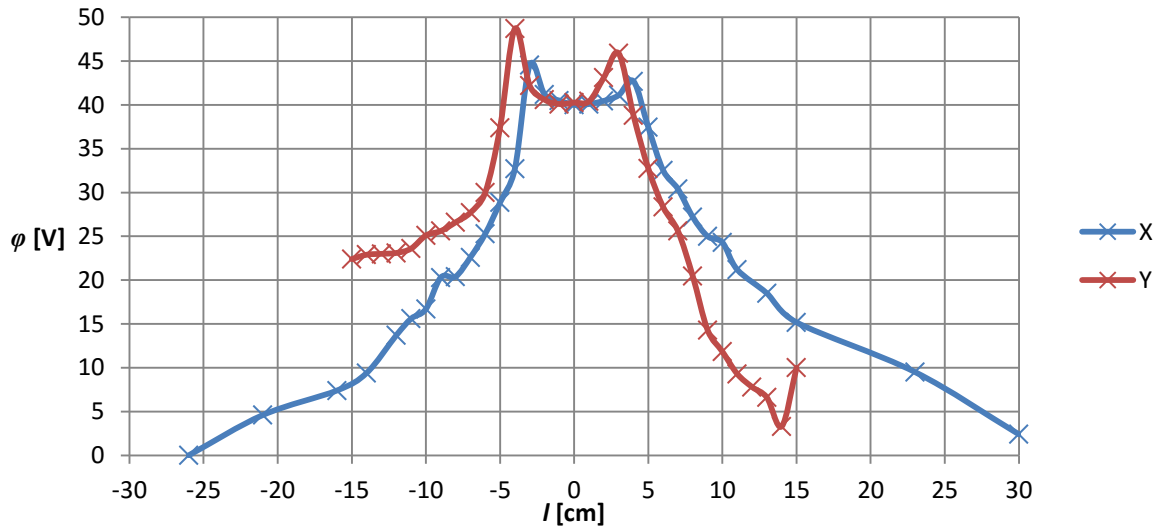


Obr. 8-4 – Krokové napětí v okolí polokulové zemnicí elektrody

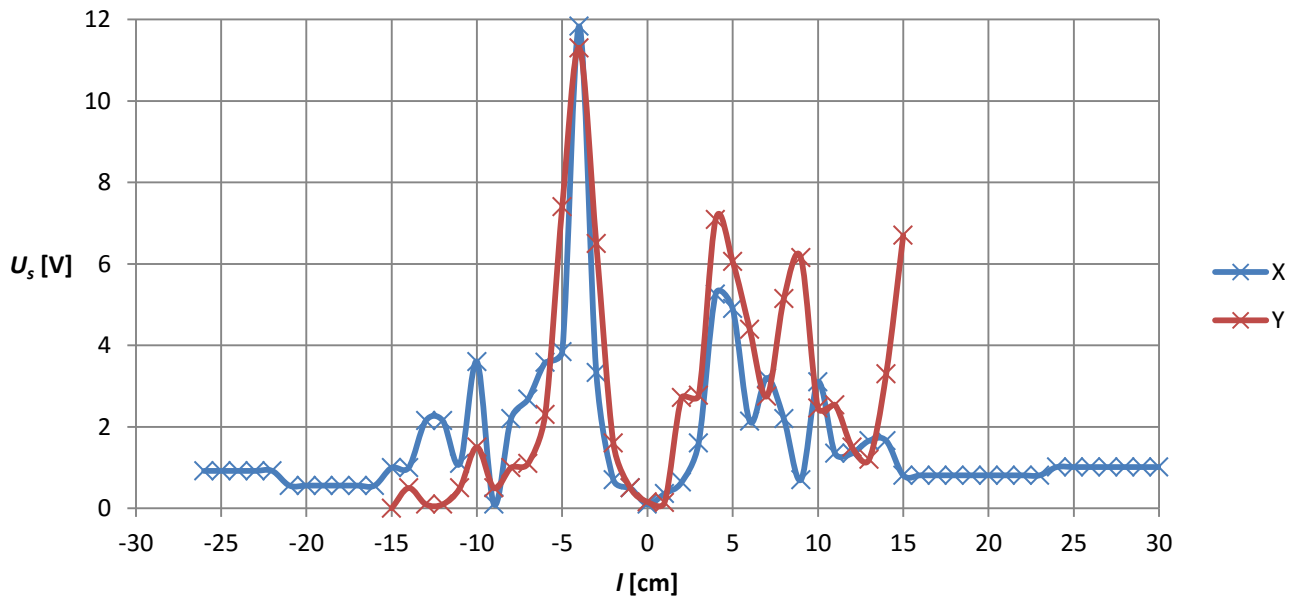
### 8.3 Jeden ekvipotenciální kruh

Tab. 8-3 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního odporu ekvipotenciálního kruhu

$U_e$ [V]	$I_e$ [A]	$U_z$ [V]	$R_{emer}$ [ $\Omega$ ]	$R_e$ [ $\Omega$ ]	$\Delta Re$ [-]	$\Delta Re\%$ [%]
49.9	0.5	169.3	99.8	149.94	51.14	33.44



Obr. 8-5 – Rozložení potenciálu v okolí ekvipotenciálního kruhu

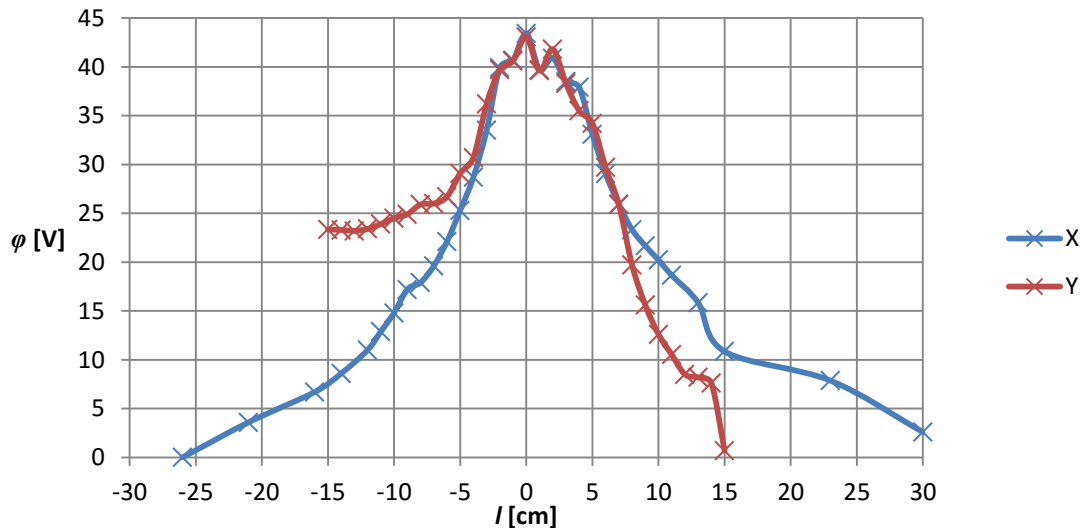


Obr. 8-6 – Krokové napětí v okolí ekvipotenciálního kruhu

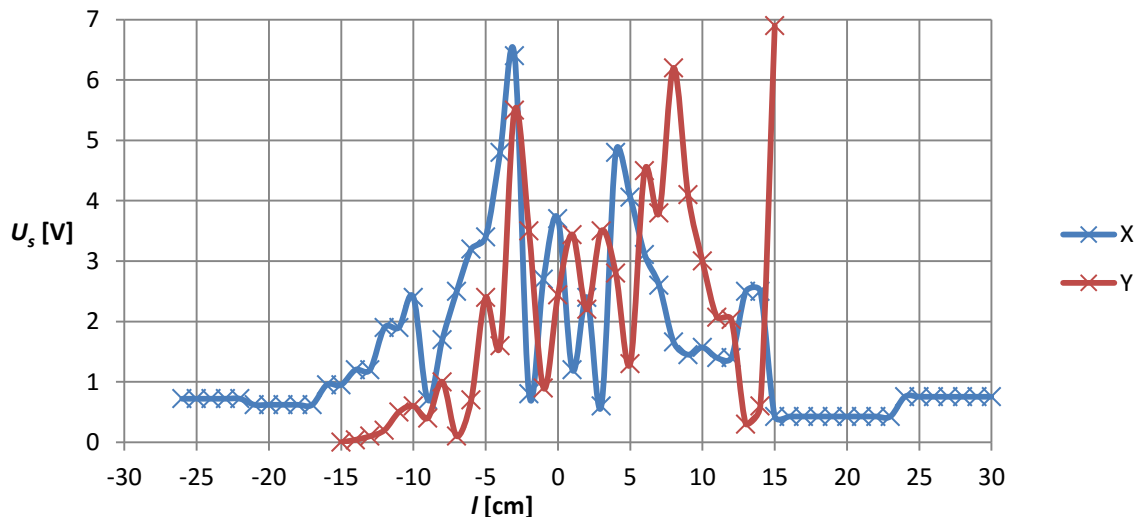
## 8.4 Dva ekvipotenciální kruhy

Tab. 8-4 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního odporu dvou ekvipotenciálních kruhů

$U_e$ [V]	$I_e$ [A]	$U_z$ [V]	$R_{emer}$ [ $\Omega$ ]	$R_e$ [ $\Omega$ ]	$\Delta Re$ [-]	$\Delta Re\%$ [%]
43.4	0.5	152.1	86.8	98.61	11.81	11.98



Obr. 8-7 – Rozložení potenciálu v okolí dvou ekvipotenciálních kruhů



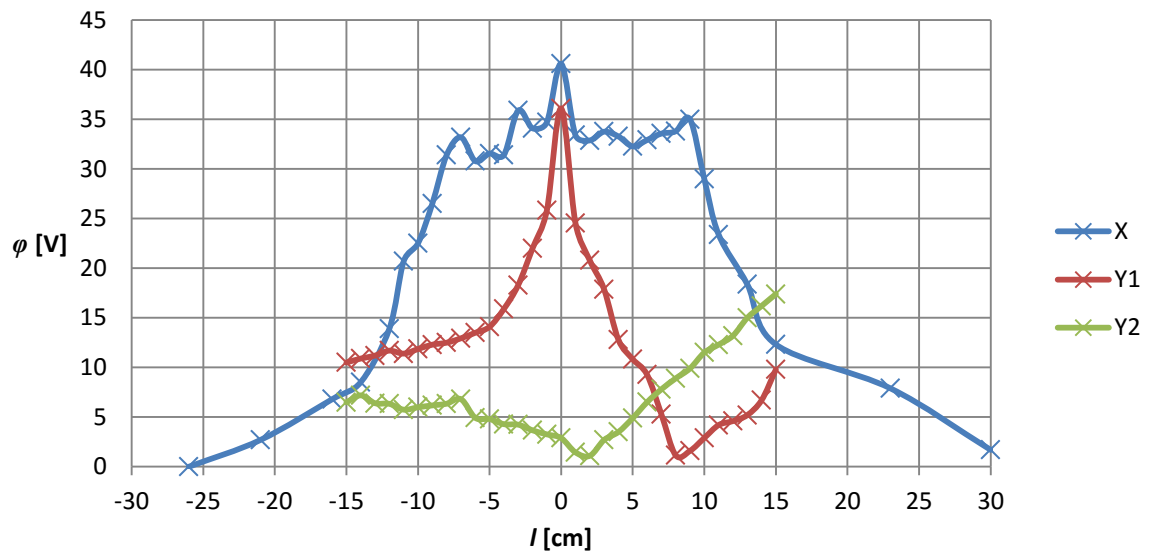
Obr. 8-8 – Krokové napětí v okolí dvou ekvipotenciálních kruhů

## 8.5 Dva pásy

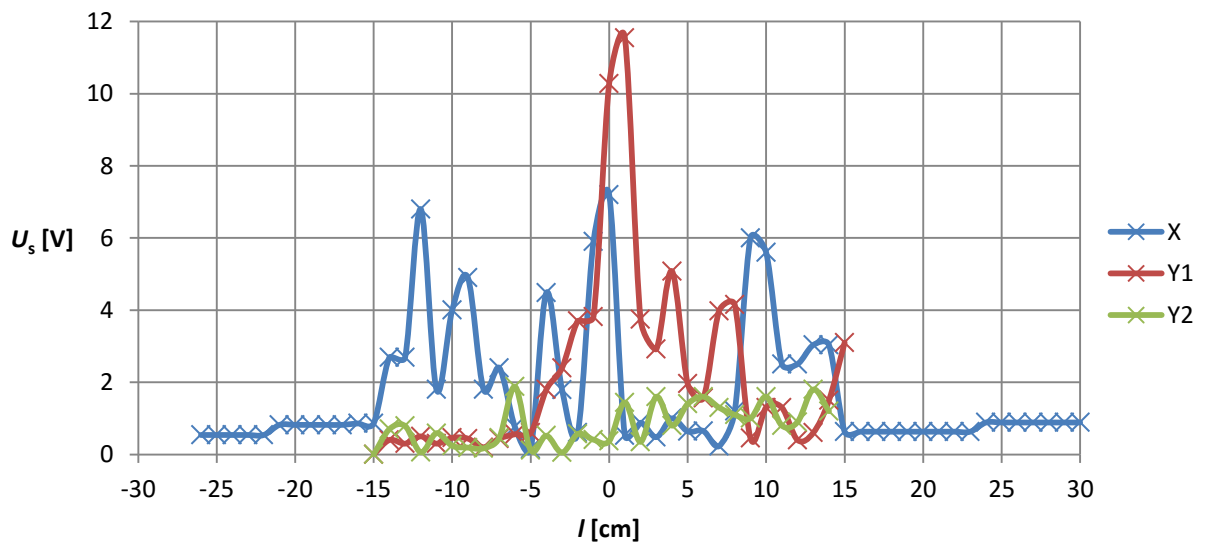
Při měření dvou zemnicích pásků bylo měření provedeno ve dvou osách kolmých na osu X (zde označené jako Y1 a Y2). Osa Y1 prochází jako v předchozích případech počátkem souřadnicového systému – bodem [0,0]. Naopak osa Y2 leží mimo zemnič (5 cm od okraje nádoby).

Tab. 8-5 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního odporu dvou zemnicích pásků

$U_e$ [V]	$I_e$ [A]	$U_z$ [V]	$R_{emer}$ [ $\Omega$ ]	$R_e$ [ $\Omega$ ]	$\Delta Re$ [-]	$\Delta Re\%$ [%]
40.6	0.5	151.6	81.2	124.76	43.56	34.92



Obr. 8-9 – Rozložení potenciálu v okolí dvou zemnicích pásků

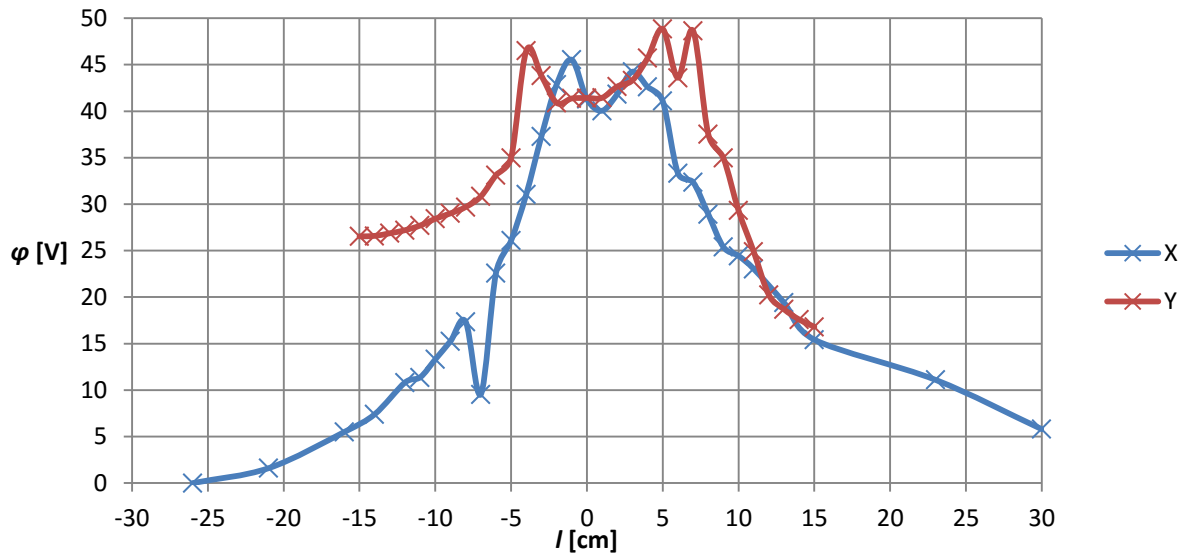


Obr. 8-10 – Krokové napětí v okolí dvou zemnicích pásků

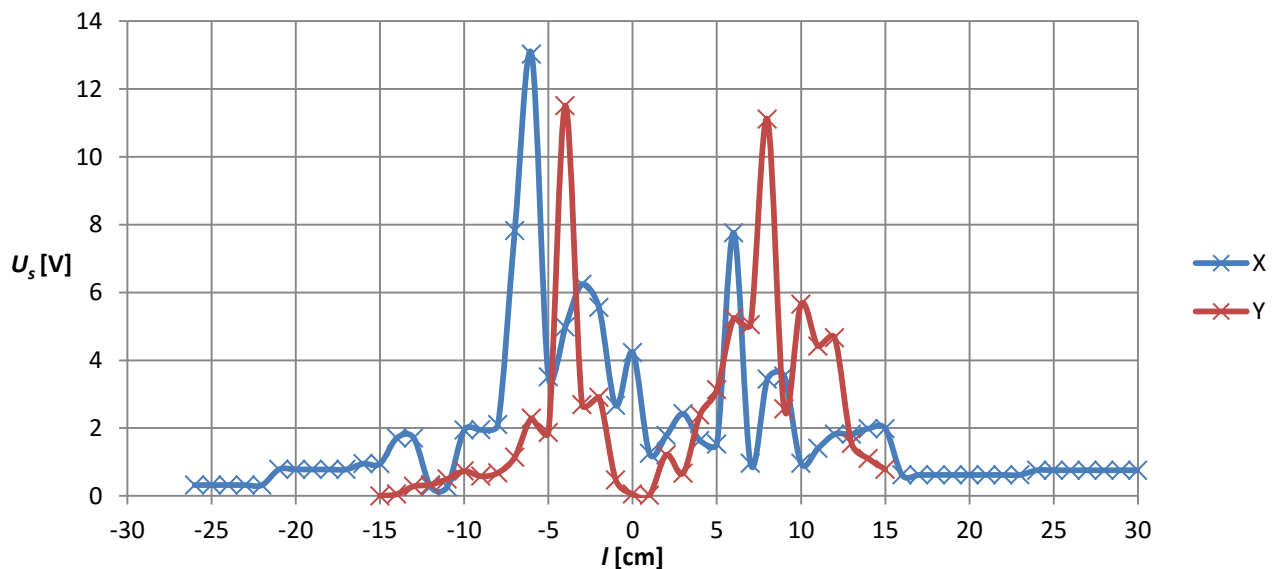
## 8.6 Model zemnicí soustavy zděné kioskové transformovny

Tab. 8-6 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního Zemnice 1

$U_e$ [V]	$I_e$ [A]	$U_z$ [V]	$R_{emer}$ [ $\Omega$ ]	$R_e$ [ $\Omega$ ]	$\Delta Re$ [-]	$\Delta Re\%$ [%]
49	0.5	155.3	98	59.92	38.08	63.55



Obr. 8-11 – Rozložení potenciálu v okolí Zemniče 1

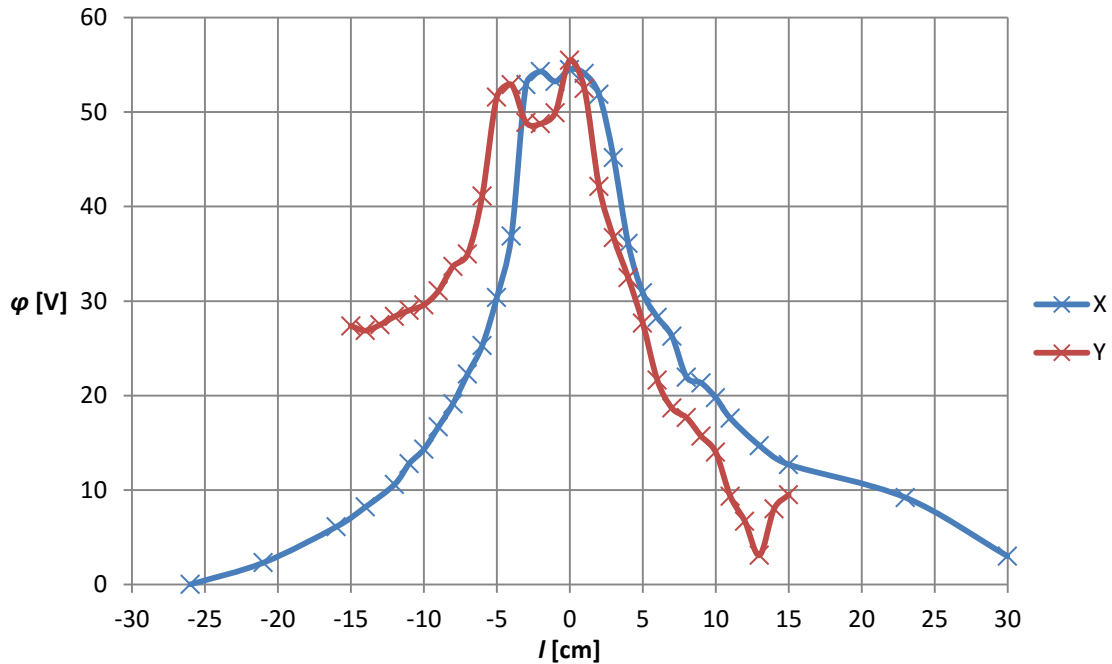


Obr. 8-12 – Krokové napětí v okolí Zemniče 1

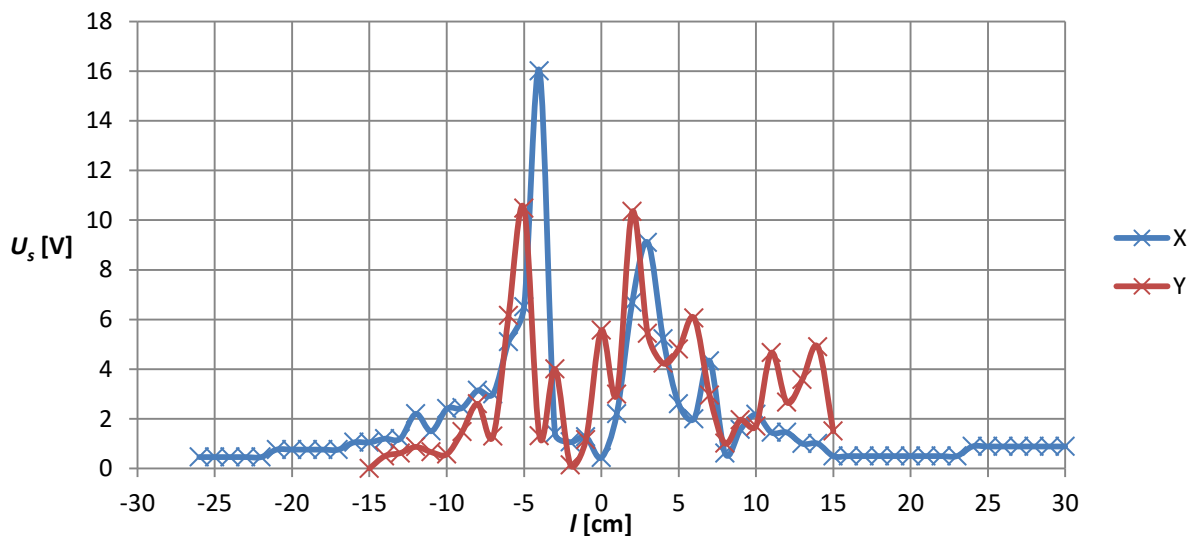
## 8.7 Model zemnicí soustavy kioskové blokové trafostanice

Tab. 8-7 – Měřené a vypočtené hodnoty zemního Zemniče 2

$U_e$ [V]	$I_e$ [A]	$U_z$ [V]	$R_{emer}$ [ $\Omega$ ]	$R_e$ [ $\Omega$ ]	$\Delta Re$ [-]	$\Delta Re\%$ [%]
57.7	0.5	163.4	115.4	76.54	38.86	50.77



Obr. 8-13 – Rozložení potenciálu v okolí Zemniče 2



Obr. 8-14 – Krokové napětí v okolí Zemniče 2

## 8.8 Shrnutí

Tab. 8-8 představuje shrnutí měření zemních odporů všech typů zemničů. Odstín červené barvy reprezentuje velikost dané veličiny, tmavší odstín znamená vyšší hodnotu. Nejvyšší zemní odpor byl spočten i naměřen u zemničí tyče. To je způsobeno velmi malou kontaktní plochou tohoto typu zemniče. Naopak nejnižšího měřeného odporu dosahovaly dva ekvipotenciální kruhy. Nejvyšší rozdíl mezi měřenou a spočtenou hodnotou je u zemničí tyče, téměř dvojnásobný. Chyba v měření já dána především měřicími přístroji napětí a proudu a také metodou výpočtu odporu, kdy do podílu dáváme dvě hodnoty zatížené chybou. V případě tyče hraje velkou roli její tvar. Při výpočtu odporu jsme uvažovali vodič kruhového průřezu, ve skutečnosti má však tyč T profil.

Tab. 8-8 – Shrnutí měření

	$U_e$ [V]	$I_e$ [A]	$U_z$ [V]	$R_{emer}$ [ $\Omega$ ]	$R_e$ [ $\Omega$ ]	$\Delta R_e$ [-]	$\Delta R_{e\%}$ [%]
Tyč	106.1	0.5	230.6	212.2	410.30	198.10	48.28
Koule	81.6	0.5	198.5	163.2	231.40	68.20	29.47
Kruh	49.9	0.5	169.3	99.8	149.94	51.14	33.44
Dva kruhy	43.4	0.5	152.1	86.8	98.61	11.81	11.98
Dva pásy	40.6	0.5	151.6	81.2	124.76	43.56	34.92
Zemnič 1	49.0	0.5	155.3	98.0	59.92	38.08	63.55
Zemnič 2	57.7	0.5	163.4	115.4	76.54	38.86	50.77

Z hlediska hodnocení krokových napětí můžeme jako nejbezpečnější označit zemničí soustavu v podobě dvou ekvipotenciálních kruhů. Zde maximální hodnota korkového napětí dosahovala méně než 7 V. Naopak jako nejméně bezpečný lze z tohoto pohledu označit tyčový zemnič s nejvyšším krokovým napětím dosahujícím 37.1 V. Všechny hodnoty jsou uvedeny v Tab. 8-9.

Tab. 8-9 – Porovnání krokových napětí

	$U_{smaxX}$ [V]	$U_{smaxY}$ [V]	$U_{smaxY2}$ [V]
Tyč	32.40	37.10	
Koule	34.30	33.40	
Kruh	11.83	11.30	
Dva kruhy	6.40	6.70	
Dva pásy	7.20	11.55	1.88
Zemnič 1	13.30	11.51	
Zemnič 2	16.01	10.47	

## 8.9 Srovnání zemničů – model vs. realita

V následující tabulce Tab. 8-10 jsou uvedeny zemní odpory všech použitých zemničů. Jde o srovnání vypočítaných hodnot zemního odporu  $R_{esr}$ , (při rezistivitě půdy  $\rho_E = 100 \Omega m$  a rozměrů zadávaných v metrech) a  $R_{esp}$ . Tato veličina  $R_{esp}$  představuje hodnotu zemního odporu reálného zemniče připočítané pomocí měřítka odporu (7.2). Absolutní chyba  $\Delta R_{es}$  je poté rozdílem těchto dvou veličin v absolutní hodnotě:

$$\Delta R_{es} = |R_{esr} - R_{esp}| \quad (8.8)$$

Abychom mohli posoudit vhodnost zvoleného měřítka, provedeme tento výpočet i bez absolutní hodnoty.

$$\Delta R_{es+/-} = R_{esr} - R_{esp} \quad (8.9)$$

V posledním sloupci Tab. 8-10 jsou tyto hodnoty zaznamenány. Pokud by všechny hodnoty vyšly kladné nebo všechny záporné, bylo by třeba měřítka upravit. Takto se některé hodnoty pohybují v kladné a některé v záporné oblasti. Můžeme tak říci, že námi použité měřítka odporu bylo navrženo dobře.

Tab. 8-10 – Porovnání zemních odporů zemniců reálných a modelů přepočítaných na reálné hodnoty

	$R_{esr}$ [ $\Omega$ ]	$R_{emer}$ [ $\Omega$ ]	$R_{esp}$ [ $\Omega$ ]	$\Delta R_{es}$ [ $\Omega$ ]	$\Delta R_{es+/-}$ [ $\Omega$ ]
Tyc	25.02	212.20	18.33	6.686	6.69
Koule	14.11	163.20	14.10	0.010	0.01
Kruh	9.14	99.80	8.62	0.517	0.52
Dva kruhy	6.01	86.80	7.50	1.490	-1.49
Dva pásy	7.61	81.20	7.02	0.594	0.59
Zemnič 1	3.65	98.00	8.47	4.817	-4.82
Zemnič 2	7.32	115.40	9.97	2.651	-2.65

Potvrdil se předpoklad, že s největší přesností vyšel odpor polokulové zemnicí elektrody, podle které bylo měřítko odporu navrženo. U složitějších typů zemniců pak můžeme pozorovat vyšší odchylku od reálné hodnoty zemního odporu. Nejvyšší rozdíl sledáváme u zemnicí tyče, zde je chyba způsobena stejnými vlivy, jaké byly zmíněny v přechozí podkapitole.

## 9 TRANSFER POTENCIÁLU

Mimo jiné lze na našem modelu simulovat i jev nazývaný transfer potenciálu. Jedná se o situaci, kdy v síti dojde k poruše (zemní spojení, zkrat) a místem poruchy protéká poruchový proud. V okolí příslušné zemnicí soustavy postiženého místa dojde k rozložení potenciálu. Pokud se blízko místa poruchy nalézá jiná zemnicí soustava např. telekomunikačního vedení, je část tohoto potenciálu přenesena na ni. Tímto mohou i v nepostižené soustavě vzniknout nebezpečná dotyková napětí.

Na modelu lze simulovat, jaký vliv má na tento přenos tvar zemniče nepostižené soustavy a také jeho vzdálenost od místa poruchy. Přítomnost cizího zemniče také ovlivňuje celkový zemní odpor soustavy.

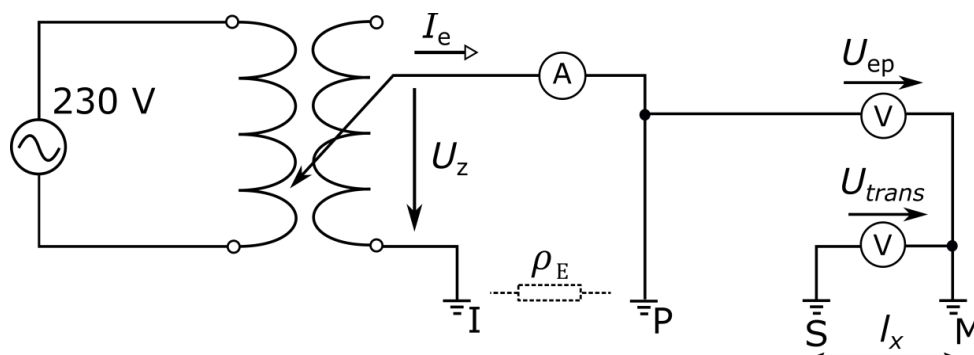
### 9.1 Měření přenosu potenciálu

Měření transferu potenciálu je naznačeno na Obr. 9-2. Postižená zemnicí soustava je zde označena jako primární – P a zemnič, na který je potenciál přenášen, jako sekundární – S. Transfer potenciálu  $U_{trans}$  měříme v ose X mezi elektrodami M a S. Ještě před uložení soustavy S změříme celkové navýšení potenciálu soustavy P ( $U_e$ ). K této hodnotě budeme poté výsledky měření vztahovat. Na začátku měření jsou obě zemnicí soustavy v doteku a tedy na stejném potenciálu. Poté postupně posunujeme soustavu S směrem k měřicí elektrodě M (měníme vzdálenost  $l_x$ ), reprezentující nulový potenciál.

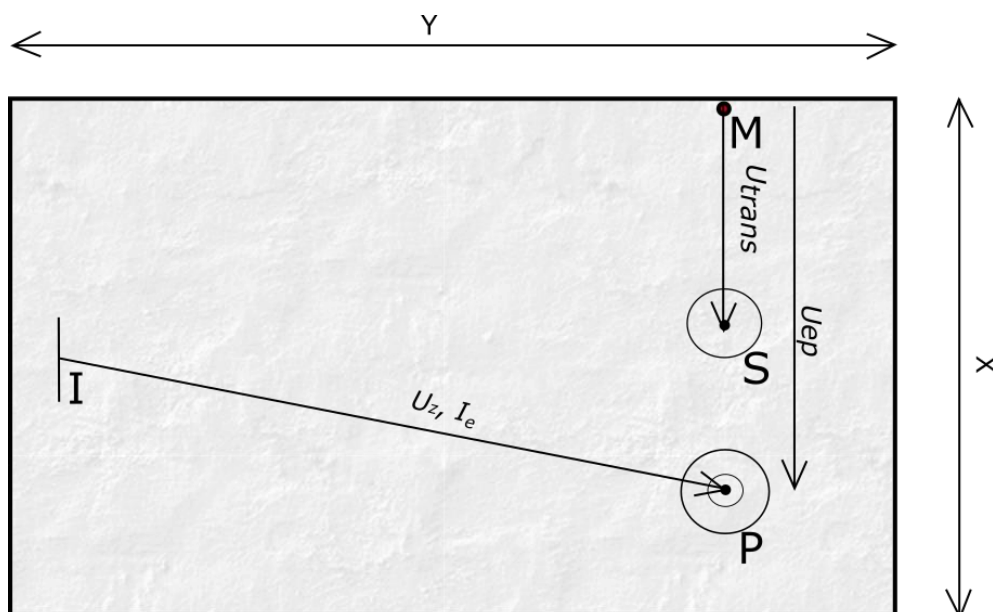
Počátek souřadnicové soustavy (bod [0,0]) při tomto měření leží na kraji zemnicí soustavy P. Po založení soustavy S se nachází v bodě doteku obou soustav. Jedná se však o stejnou souřadnici.

Během měření dále zaznamenáváme navýšení potenciálu primární elektrody  $U_{ep}$  a poruchový proud  $I_e$ . Tyto hodnoty jsou potřebné k vypočítání celkového zemního odporu primárního zemniče  $R_{ec}$ .

Pro porovnání budeme měřit i rozložení potenciálu  $\varphi$  bez přítomnosti cizí zemnicí soustavy. Můžeme tak přímo porovnat rozdíl mezi  $\varphi$  a  $U_{trans}$  a zjistit, jaký má konkrétní zemnič vliv na výsledné hodnoty. Postup tohoto měření je popsán v kapitole 6.3.



Obr. 9-1 – Elektrické schéma měření transferu potenciálu



Obr. 9-2 – Měření transferu potenciálu

Elektrické schéma měření transferu potenciálu je znázorněno na Obr. 9-1. Značení veličin a elektrod opět koresponduje se značením na Obr. 9-2.

## 9.2 Výstup měření

Výstupem měření by měl být výsledný vliv cizího zemniče na celkový zemní odpor soustavy P a dále velikost přeneseného potenciálu v okolí soustavy P do soustavy S.

Jak již bylo řečeno, celkový zemní odpor  $R_{ec}$  určíme pro každý bod dle Ohmova zákona

$$R_{ec} = \frac{U_{ep}}{I_e} \quad (8.10)$$

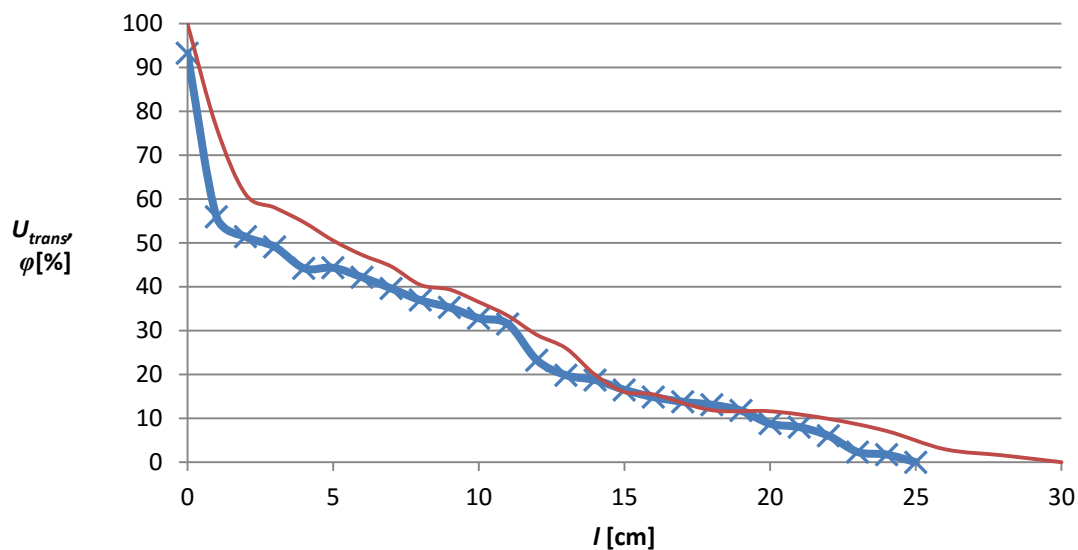
kde  $U_{ep}$  je navýšení potenciálu primární elektrody a  $I_e$  zemní proud poruchy.

Skutečný celkový zemní odpor získáme přepočtem pomocí měřítka odporu (7.2)

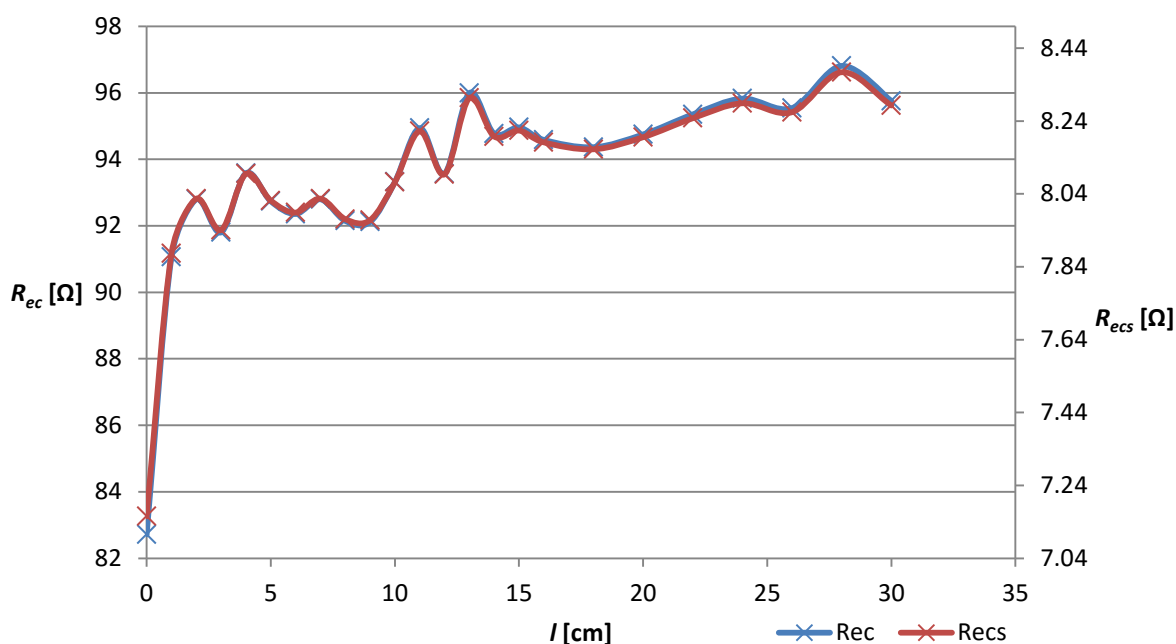
$$R_{ecs} = M_R \cdot R_{ec} \quad (8.11)$$

Jelikož do grafu Obr. 9-3 vynášíme hodnoty v procentech, budeme obě hodnoty  $\varphi$  a  $U_{trans}$  vztahovat k hodnotě  $U_e$ , tedy k navýšení potenciálu soustavy P bez přítomnosti cizího zemniče.

$$\varphi_{\%}(U_{trans\%}) = \frac{\varphi(U_{trans})}{U_e} \cdot 100 \quad (8.12)$$



Obr. 9-3 – Graf transferu potenciálu ze zemniče P na zemnič S, modrá křivka reprezentuje  $U_{trans}$ , červená  $\phi$



Obr. 9-4 – Vliv vzdálenosti zemniče S na celkový zemní odpor zemnicí soustavy P

Na Obr. 9-3 můžeme pozorovat vliv tvaru zemniče S. V našem případě byl použit kruh o poloměru 3 cm. Do vzdálenosti 5 cm je charakteristika  $U_{trans}$  strmější než rozložení potenciálu  $\phi$ , měřené bodovou elektrodou (drát o průměru 18,95 mm), dále mají křivky podobnou strmost. Tento jev je způsoben sekundárním zemničem S, jelikož zaujímá větší plochu, překlene také větší potenciálový spád. Výsledkem je pak strmější charakteristika v blízkém okolí primárního zemniče, kde je potenciálový spád také strmější.

Na Obr. 9-4 je znázorněn vliv vzdálenosti sekundárního zemniče od primárního zemniče na celkový zemní odpor primární zemnicí soustavy. V počátku charakteristiky jsou obě elektrody v doteku a celkový zemní odpor je vlivem velké kontaktní plochy obou zemničů nejmenší. Na

pravé ose je pomocí (7.2)  $R_{ec}$  přepočítán na skutečný odpor  $R_{ecs}$ . Můžeme tedy sledovat, jak se bude celkový zemní odpor měnit v reálné situaci.

Tab. 9-1 – Výchozí stav měření, před založením sekundárního zemniče

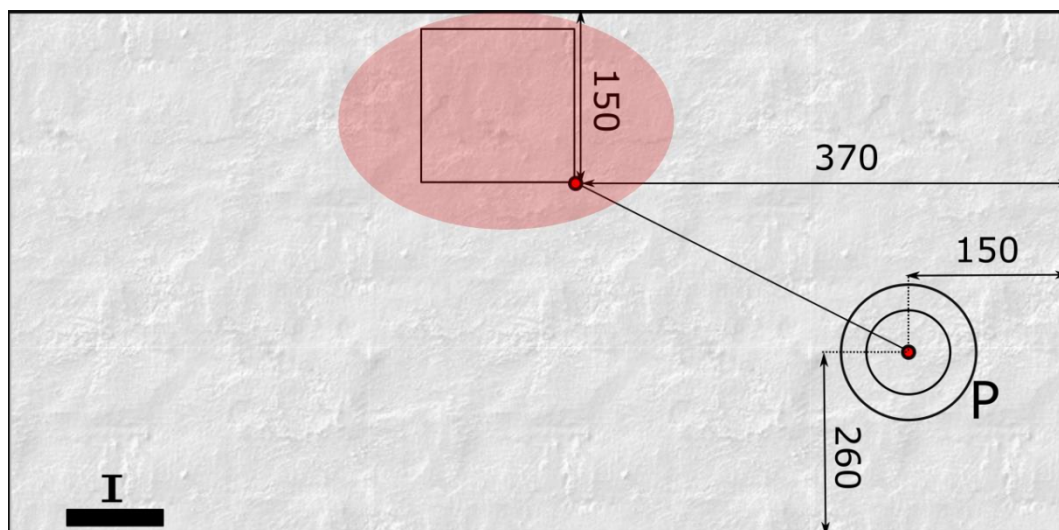
$U_z$ [V]	$U_e$ [V]	$I_e$ [A]	$R_e$ [ $\Omega$ ]
126	45.7	0.5	69.74

Tab. 9-2 – Změřené hodnoty transferu potenciálu

$l$ [cm]	$U_{trans}$ [V]	$U_{trans\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi\%$ [%]	$\varphi$ [V]	$U_{ep}$ [V]	$I_e$ [A]	$R_{ec}$ [ $\Omega$ ]
0	42.60	93.217	0	100.000	45.70	42.6	0.515	82.718
1	25.58	55.974	1	76.302	34.87	44.8	0.492	91.057
2	23.49	51.400	2	61.072	27.91	45.1	0.486	92.798
3	22.44	49.103	3	58.031	26.52	44.8	0.488	91.803
4	20.21	44.223	4	54.705	25.00	45.2	0.483	93.582
5	20.26	44.333	5	50.547	23.10	44.7	0.482	92.739
6	19.27	42.166	6	47.243	21.59	44.7	0.484	92.355
7	18.10	39.606	7	44.617	20.39	45.1	0.486	92.798
8	16.88	36.937	8	40.416	18.47	44.6	0.484	92.149
9	16.12	35.274	9	39.365	17.99	44.4	0.482	92.116
10	15.00	32.823	10	36.521	16.69	44.7	0.479	93.319
11	14.40	31.510	11	33.392	15.26	45	0.474	94.937
12	10.62	23.239	12	29.015	13.26	45.1	0.482	93.568
13	9.06	19.825	13	25.952	11.86	45.5	0.474	95.992
14	8.56	18.731	14	19.891	9.09	45.3	0.478	94.770
15	7.54	16.499	15	16.018	7.32	45.2	0.476	94.958
16	6.78	14.836	16	15.449	7.06	45.4	0.480	94.583
17	6.30	13.786	18	11.860	5.42	45.2	0.479	94.363
18	5.99	13.107	20	11.619	5.31	45.1	0.476	94.748
19	5.38	11.772	22	9.891	4.52	45.1	0.473	95.349
20	4.01	8.775	24	7.112	3.25	45.9	0.479	95.825
21	3.66	8.009	26	2.954	1.35	45	0.471	95.541
22	2.76	6.039	28	1.554	0.71	45.5	0.470	96.809
23	1.07	2.341	30	0.000	0.00	45.1	0.471	95.754
24	0.80	1.751						
25	0.00	0.000						

## 10 KONTROLA NEBEZPEČNÝCH KROKOVÝCH NAPĚTÍ

Jako indikátor nebezpečných krokových napětí bude v našem případě sloužit LED dioda. Na modelu bude simulována porucha, kdy se PEN vodičem přenesse na obvodový zemnič rodinného domu napětí. V okolí domu budeme poté indikovat místa s nebezpečným krokovým napětím. Situace je znázorněna na Obr. 10-1.



Obr. 10-1 – Kontrola nebezpečných krokových napětí

Elektroda P představuje zemnicí soustavu distribuční trafostanice spojenou s obvodovým zemničem rodinného domu. Elektrodou I injektujeme proud a v oblasti kolem domu (označeno červeně) očekáváme přítomnost krokových a dotykových napětí. Za pomoci bipolární LED diody budeme hledat místa s nebezpečným krokovým napětím (5 V a více), právě při tomto napětí je svítivost diody největší.



Obr. 10-2 – Model rodinného domu s připojeným PEN vodičem k obvodovému zemniči, model distribuční trafostanice

## 11 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo sestavit model zemnicí soustavy, použitelný pro laboratorní výuku a jiné experimenty. Tento model se měl sestávat z nádoby s vhodnou zeminou, respektive směsí reprezentující reálnou zem, a modely nejčastěji používaných zemnicích soustav (zemničů).

Nejdříve bylo nutno nalézt správnou směs, která by měla vhodnou rezistivitu pro další měření. Nejdůležitějšími parametry, které musely být splněny, byly poměrně nízký zemní proud tak, aby nedocházelo k velkému ohřívání směsi a zemničů, zároveň však dostatečně vysoké napětí, abychom byli schopni měřit rozložení potenciálu na povrchu země. Toho bylo dosaženo kombinací granátového písku a grafitu. Referenční rezistivita  $\rho_{em}$  byla stanovena na 1640  $\Omega\text{cm}$ , tím byl také určen referenční zemní proud  $I_e$  0,5 A.

Po stanovení referenčních podmínek směsi modelu bylo třeba zkonstruovat modely nejpoužívanějších typů zemnicích soustav v reálné síti, včetně referenčního zemniče – polokulové zemnicí elektrody. Pro všechny tyto zemniče byl spočítán jejich zemní odpor na základě jejich rozměrů. Následně pak provedena měření právě zemního odporu a rozložení potenciálu na povrchu země. Měřené hodnoty mohly být porovnány s těmi vypočtenými. Tato měření také posloužila ke stanovení měřítka odporu.

Aby bylo možno model využít pro simulaci reálných poruch v síti, bylo třeba stanovit patřičná měřítka, abychom se z modelových hodnot dostali na ty reálné. Jako první bylo stanoveno měřítko délky. Nejvhodnější bylo vytvořit model v měřítku 1:100, tedy jeden metr ve skutečnosti odpovídá jednomu centimetru na modelu. Jak již bylo zmíněno, pro stanovení měřítka odporu bylo využito měření zemního odporu. Referenční zemnič byla polokulová zemnicí elektroda. Při stanovení měřítka jsme vycházeli z předpokladu, že se tento zemnič bude chovat v podmínkách modelu úplně stejně jako tatáž elektroda se stejnými rozměry v metrech zasazená v půdě o rezistivitě 100  $\Omega\text{m}$  (reálná situace). Měřítka odporu je tedy podíl skutečné hodnoty zemního odporu reálného zemniče (vypočítané) a námi změřené hodnoty na modelu. Měřítka napětí pak bylo stanoveno z nejvyšší dovolené hodnoty dotykového napětí. V reálné síti je nejvyšší dovolená hodnota dotykového napětí (trvalý stav) 80 V. Na našem modelu byla tato hodnota stanovena na 5 V (maximální svítivost bipolární LED diody). Měřítka proudu bylo poté jednoduše stanoveno pomocí Ohmova zákona.

Model byl dále využit pro měření transferu potenciálu, kde bylo pozorováno chování primární a sekundární zemnicí soustavy v závislosti na vzájemné vzdálenosti a konstrukci. Bylo zjištěno, jakým způsobem je ovlivňován přenesený potenciál do zdravé zemnicí soustavy a také jakým způsobem ovlivňuje vzájemná vzdálenost soustav zemní odpor poruchou postižené soustavy.

Tento model tedy lze využít k řadě experimentů. Ať se jedná o měření zemních odporů zemnicích soustav a rozložení potenciálu na povrchu země. Což může být velmi přínosné například při návrhu nového typu zemnicí soustavy. Po sestavení modelu lze velmi jednoduše simulovat jeho chování ještě před tím, než bude zhotoven přípravek pro testování v reálném prostředí. Další možností je pak měření transferu potenciálu v závislosti na typu zemniče a jeho vzdálenosti od poruchou postižené soustavy. Toto měření lze v reálných podmínkách, z pochopitelných důvodů, provádět jen velmi těžce. S použitím modelu je měření jednoduché a relativně nenáročné. V poslední řadě pak můžeme testovat zemnicí soustavy z hlediska bezpečnosti na dotyková a kroková napětí. Je zde možno měřit kroková napětí po celé ploše modelu nebo pouze za použití LED diody indikovat místa s nebezpečným krokovým napětím.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] - STEINBAUER, Miloslav a Pavel KALÁB. *Bezpečnost v elektrotechnice* [online]. Brno: Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky, 2011 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.utee.feec.vutbr.cz/?q=cs/elektrotechnicka-kvalifikace>
- [2] - MAŠEK, J. *Výpočet a technické řešení uzemňovací soustavy transformovny 110/22 kV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 65s. Vedoucí diplomové práce Ing. Branislav Bátora
- [3] - PNE 33 0000-4. *Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny*. 3. vyd. Český normalizační institut, 2011.
- [4] - SÍTAŘ, M. *Měření zemnicích soustav VN/NN a dotykových napětí v okolí DTS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 84 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Kopicčka.
- [5] - ČSN 50522. *Uzemňování elektrických instalací AC nad 1 kV*. [s.l.] : Český normalizační institut, Prosinec 2011.
- [6] - OMICRON ELECTRONICS GmbH. *CPC 100 Reference Manual*. 2007, 368 s.

## PŘÍLOHY

### Příloha A – Doplnění kapitoly 5, tabulky měřených hodnot, grafy v poměrných hodnotách

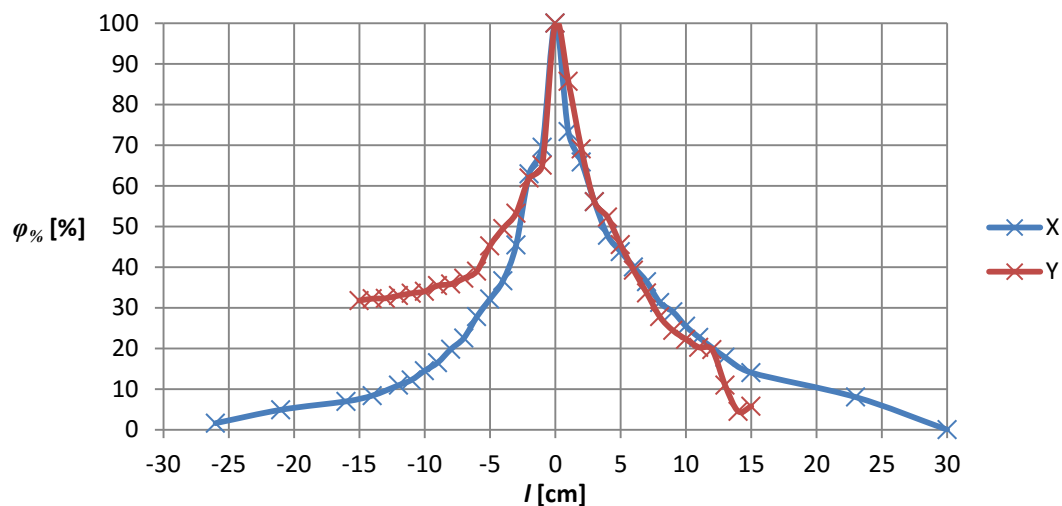
#### Tyčový zemnič

Tabulka 1 – Měřené hodnoty rozložení potenciálu tyčového zemniče

Osa X				Osa Y			
l [cm]	$\varphi$ [V]	l [cm]	$\varphi$ [V]	l [cm]	$\varphi$ [V]	l [cm]	$\varphi$ [V]
-26	1.70	0	106.10	-15	33.70	1	90.90
-21	5.20	1	77.80	-14	34.20	2	73.30
-16	7.40	2	69.90	-13	34.30	3	59.50
-14	8.90	3	59.50	-12	35.00	4	55.50
-12	11.60	4	50.70	-11	35.60	5	48.30
-11	13.00	5	46.50	-10	36.10	6	41.60
-10	15.40	6	42.50	-9	37.60	7	35.70
-9	17.50	7	38.60	-8	38.00	8	29.50
-8	21.00	8	33.20	-7	39.50	9	25.90
-7	23.90	9	30.80	-6	41.40	10	23.60
-6	29.50	10	27.00	-5	48.00	11	21.50
-5	34.10	11	24.10	-4	52.50	12	20.90
-4	38.90	13	18.90	-3	56.50	13	11.60
-3	48.20	15	14.90	-2	65.70	14	4.80
-2	66.80	23	8.50	-1	69.00	15	6.10
-1	73.70	30	0.00	0	106.10		

Tabulka 2 – Poměrné hodnoty rozložení potenciálu tyčového zemniče

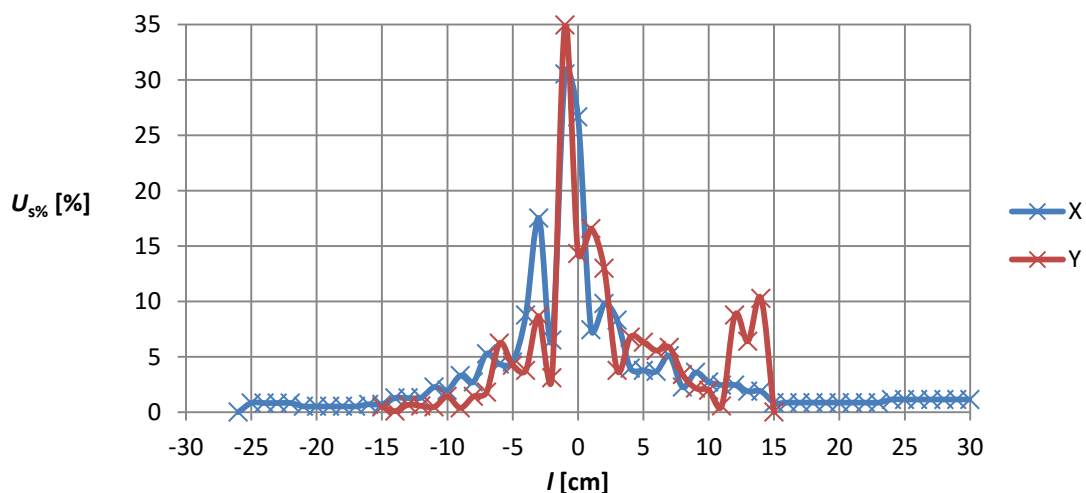
Osa X				Osa Y			
l [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	l [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	l [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	l [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]
-26	1.60	0	100.00	-15	31.76	1	85.67
-21	4.90	1	73.33	-14	32.23	2	69.09
-16	6.97	2	65.88	-13	32.33	3	56.08
-14	8.39	3	56.08	-12	32.99	4	52.31
-12	10.93	4	47.79	-11	33.55	5	45.52
-11	12.25	5	43.83	-10	34.02	6	39.21
-10	14.51	6	40.06	-9	35.44	7	33.65
-9	16.49	7	36.38	-8	35.82	8	27.80
-8	19.79	8	31.29	-7	37.23	9	24.41
-7	22.53	9	29.03	-6	39.02	10	22.24
-6	27.80	10	25.45	-5	45.24	11	20.26
-5	32.14	11	22.71	-4	49.48	12	19.70
-4	36.66	13	17.81	-3	53.25	13	10.93
-3	45.43	15	14.04	-2	61.92	14	4.52
-2	62.96	23	8.01	-1	65.03	15	5.75
-1	69.46	30	0.00	0	100.00		



Obrázek 1 – Rozložení potenciálu tyčového zemniče v poměrných hodnotách

Tabulka 3 – Měřené hodnoty krokového napětí v okolí tyčového zemniče

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]
-26	0.00	3	8.80	-15	0.50	1	17.60
-25	0.88	4	4.20	-14	0.10	2	13.80
-24	0.88	5	4.00	-13	0.70	3	4.00
-23	0.88	6	3.90	-12	0.60	4	7.20
-22	0.88	7	5.40	-11	0.50	5	6.70
-21	0.55	8	2.40	-10	1.50	6	5.90
-20	0.55	9	3.80	-9	0.40	7	6.20
-19	0.55	10	2.90	-8	1.50	8	3.60
-18	0.55	11	2.60	-7	1.90	9	2.30
-17	0.55	12	2.60	-6	6.60	10	2.10
-16	0.75	13	2.00	-5	4.50	11	0.60
-15	0.75	14	2.00	-4	4.00	12	9.30
-14	1.35	15	0.91	-3	9.20	13	6.80
-13	1.35	16	0.91	-2	3.30	14	10.90
-12	1.40	17	0.91	-1	37.10	15	0.00
-11	2.40	18	0.91	0	15.20		
-10	2.10	19	0.91				
-9	3.50	20	0.91				
-8	2.90	21	0.91				
-7	5.60	22	0.91				
-6	4.60	23	0.91				
-5	4.80	24	1.21				
-4	9.30	25	1.21				
-3	18.60	26	1.21				
-2	6.90	27	1.21				
-1	32.40	28	1.21				
0	28.30	29	1.21				
1	7.90	30	1.21				
2	10.40						



Obrázek 2 – Krokové napětí v okolí tyčového zemniče v poměrných hodnotách

Tabulka 4 – Krokové napětí v okolí tyčového zemniče v poměrných hodnotách

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]
-26	0.00	3	8.29	-15	0.47	1	16.59
-25	0.82	4	3.96	-14	0.09	2	13.01
-24	0.82	5	3.77	-13	0.66	3	3.77
-23	0.82	6	3.68	-12	0.57	4	6.79
-22	0.82	7	5.09	-11	0.47	5	6.31
-21	0.52	8	2.26	-10	1.41	6	5.56
-20	0.52	9	3.58	-9	0.38	7	5.84
-19	0.52	10	2.73	-8	1.41	8	3.39
-18	0.52	11	2.45	-7	1.79	9	2.17
-17	0.52	12	2.45	-6	6.22	10	1.98
-16	0.71	13	1.89	-5	4.24	11	0.57
-15	0.71	14	1.89	-4	3.77	12	8.77
-14	1.27	15	0.86	-3	8.67	13	6.41
-13	1.27	16	0.86	-2	3.11	14	10.27
-12	1.32	17	0.86	-1	34.97	15	0.00
-11	2.26	18	0.86	0	14.33		
-10	1.98	19	0.86				
-9	3.30	20	0.86				
-8	2.73	21	0.86				
-7	5.28	22	0.86				
-6	4.34	23	0.86				
-5	4.52	24	1.14				
-4	8.77	25	1.14				
-3	17.53	26	1.14				
-2	6.50	27	1.14				
-1	30.54	28	1.14				
0	26.67	29	1.14				
1	7.45	30	1.14				
2	9.80						

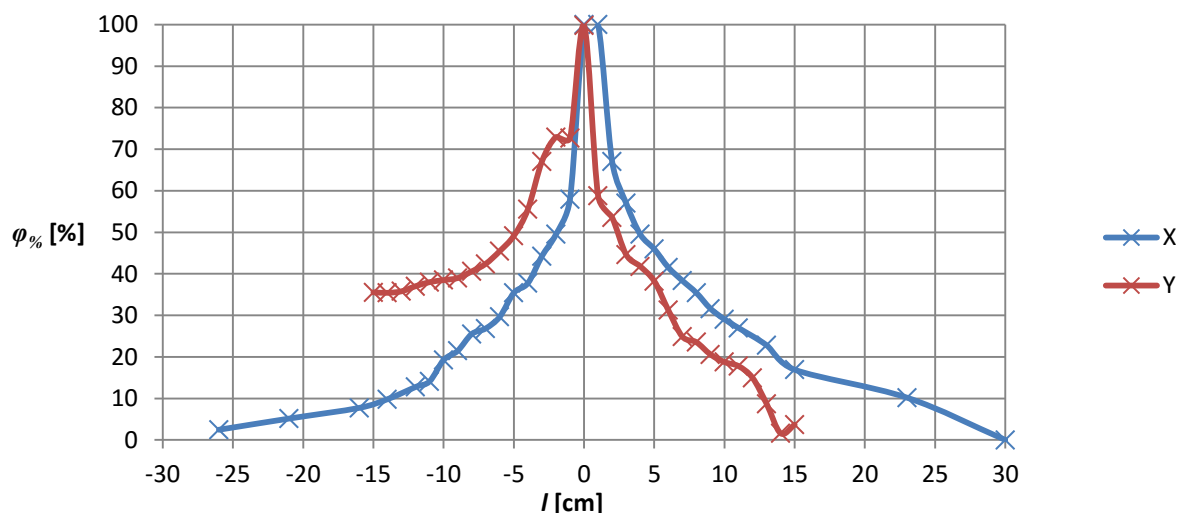
## Polokulová zemnicí elektroda

Tabulka 5 – Měřené hodnoty rozložení potenciálu polokulové zemnicí elektrody

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]
-26	79.60	0	0.00	-15	52.60	1	33.60
-21	77.40	1	0.00	-14	52.70	2	37.90
-16	75.30	2	26.90	-13	52.40	3	45.20
-14	73.60	3	35.09	-12	51.40	4	47.50
-12	71.20	4	41.20	-11	50.60	5	50.40
-11	70.10	5	44.10	-10	50.20	6	56.10
-10	65.90	6	47.70	-9	49.80	7	61.30
-9	64.10	7	50.30	-8	48.50	8	62.40
-8	60.80	8	52.70	-7	47.00	9	64.80
-7	59.70	9	55.80	-6	44.50	10	66.30
-6	57.40	10	57.90	-5	41.50	11	67.10
-5	52.70	11	59.60	-4	36.30	12	69.40
-4	50.80	13	63.00	-3	26.90	13	74.50
-3	45.50	15	67.80	-2	22.10	14	80.30
-2	41.20	23	73.30	-1	22.30	15	84.60
-1	34.30	30	81.60	0	0.20		

Tabulka 6 – Poměrné hodnoty rozložení potenciálu polokulové zemnicí elektrody

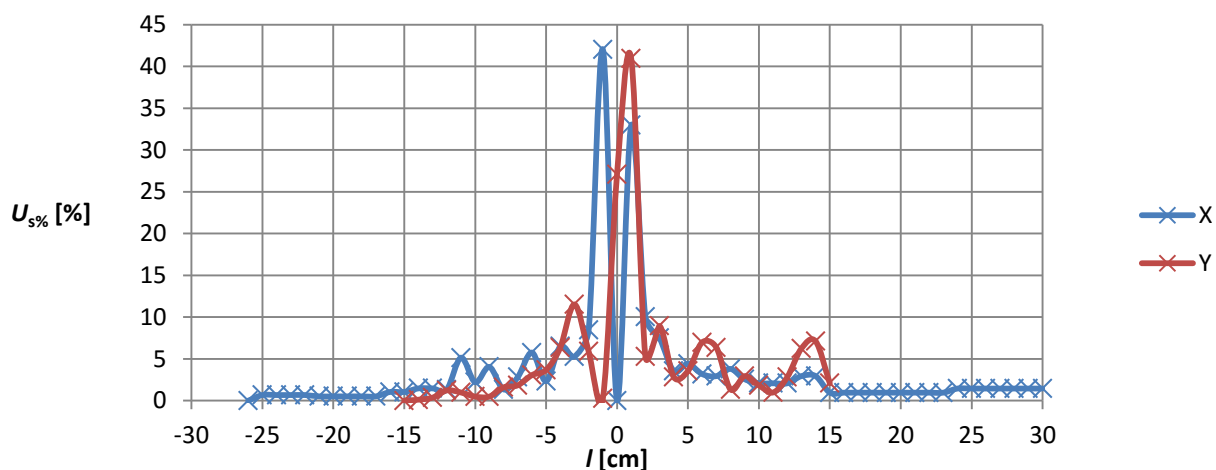
Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]
-26	2.45	0	100.00	-15	35.54	1	58.82
-21	5.15	1	100.00	-14	35.42	2	53.55
-16	7.72	2	67.03	-13	35.78	3	44.61
-14	9.80	3	57.00	-12	37.01	4	41.79
-12	12.75	4	49.51	-11	37.99	5	38.24
-11	14.09	5	45.96	-10	38.48	6	31.25
-10	19.24	6	41.54	-9	38.97	7	24.88
-9	21.45	7	38.36	-8	40.56	8	23.53
-8	25.49	8	35.42	-7	42.40	9	20.59
-7	26.84	9	31.62	-6	45.47	10	18.75
-6	29.66	10	29.04	-5	49.14	11	17.77
-5	35.42	11	26.96	-4	55.51	12	14.95
-4	37.75	13	22.79	-3	67.03	13	8.70
-3	44.24	15	16.91	-2	72.92	14	1.59
-2	49.51	23	10.17	-1	72.67	15	3.68
-1	57.97	30	0.00	0	99.75		



Obrázek 3 – Rozložení potenciálu polokulové zemnicí elektrody v poměrných hodnotách

Tabulka 7 – Měřené hodnoty krokového napětí v okolí polokulové zemnicí elektrody

Osa X				Osa Y			
I [cm]	$U_s$ [V]	I [cm]	$U_s$ [V]	I [cm]	$U_s$ [V]	I [cm]	$U_s$ [V]
-26	0.00	3	6.11	-15	0.00	1	33.40
-25	0.55	4	2.90	-14	0.10	2	4.30
-24	0.55	5	3.60	-13	0.30	3	7.30
-23	0.55	6	2.60	-12	1.00	4	2.30
-22	0.55	7	2.40	-11	0.80	5	2.90
-21	0.42	8	3.10	-10	0.40	6	5.70
-20	0.42	9	2.10	-9	0.40	7	5.20
-19	0.42	10	1.70	-8	1.30	8	1.10
-18	0.42	11	1.70	-7	1.50	9	2.40
-17	0.42	12	1.70	-6	2.50	10	1.50
-16	0.85	13	2.40	-5	3.00	11	0.80
-15	0.85	14	2.40	-4	5.20	12	2.30
-14	1.20	15	0.79	-3	9.40	13	5.10
-13	1.20	16	0.79	-2	4.80	14	5.80
-12	1.10	17	0.79	-1	0.20	15	4.30
-11	4.20	18	0.79	0	22.10		
-10	1.80	19	0.79				
-9	3.30	20	0.79				
-8	1.10	21	0.79				
-7	2.30	22	0.79				
-6	4.70	23	0.79				
-5	1.90	24	1.19				
-4	5.30	25	1.19				
-3	4.30	26	1.19				
-2	6.90	27	1.19				
-1	34.30	28	1.19				
0	0.00	29	1.19				
1	26.90	30	1.19				
2	8.19						



Obrázek 4 – Krokové napětí v okolí polokulové zemnicí elektrody v poměrných hodnotách

Tabulka 8 – Krokové napětí v okolí polokulové zemnicí elektrody v poměrných hodnotách

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]
-26	0.00	3	7.49	-15	0.00	1	40.93
-25	0.67	4	3.55	-14	0.12	2	5.27
-24	0.67	5	4.41	-13	0.37	3	8.95
-23	0.67	6	3.19	-12	1.23	4	2.82
-22	0.67	7	2.94	-11	0.98	5	3.55
-21	0.51	8	3.80	-10	0.49	6	6.99
-20	0.51	9	2.57	-9	0.49	7	6.37
-19	0.51	10	2.08	-8	1.59	8	1.35
-18	0.51	11	2.08	-7	1.84	9	2.94
-17	0.51	12	2.08	-6	3.06	10	1.84
-16	1.04	13	2.94	-5	3.68	11	0.98
-15	1.04	14	2.94	-4	6.37	12	2.82
-14	1.47	15	0.96	-3	11.52	13	6.25
-13	1.47	16	0.96	-2	5.88	14	7.11
-12	1.35	17	0.96	-1	0.25	15	2.08
-11	5.15	18	0.96	0	27.08		
-10	2.21	19	0.96				
-9	4.04	20	0.96				
-8	1.35	21	0.96				
-7	2.82	22	0.96				
-6	5.76	23	0.96				
-5	2.33	24	1.45				
-4	6.50	25	1.45				
-3	5.27	26	1.45				
-2	8.46	27	1.45				
-1	42.03	28	1.45				
0	0.00	29	1.45				
1	32.97	30	1.45				
2	10.04						

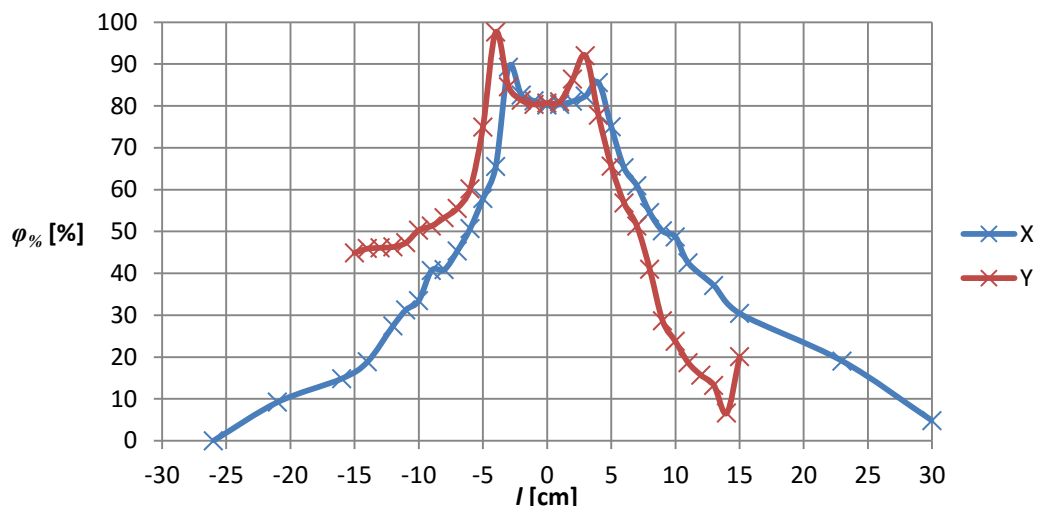
## Jeden ekvipotenciální kruh

Tabulka 9 – Měřené hodnoty rozložení potenciálu ekvipotenciálního kruhu

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]
-26	49.90	0	9.90	-15	27.50	1	9.50
-21	45.30	1	9.80	-14	27.00	2	6.78
-16	42.50	2	9.44	-13	26.90	3	4.01
-14	40.50	3	8.80	-12	26.80	4	11.10
-12	36.20	4	7.20	-11	26.30	5	17.16
-11	34.30	5	12.46	-10	24.80	6	21.55
-10	33.20	6	17.36	-9	24.30	7	24.30
-9	29.60	7	19.50	-8	23.30	8	29.45
-8	29.50	8	22.70	-7	22.20	9	35.60
-7	27.30	9	24.90	-6	19.90	10	38.06
-6	24.62	10	25.60	-5	12.50	11	40.60
-5	21.04	11	28.70	-4	1.20	12	42.10
-4	17.20	13	31.40	-3	7.70	13	43.30
-3	5.37	15	34.72	-2	9.30	14	46.60
-2	8.70	23	40.40	-1	9.80	15	59.90
-1	9.40	30	47.50	0	9.64		

Tabulka 10 – Poměrné hodnoty rozložení potenciálu ekvipotenciálního kruhu

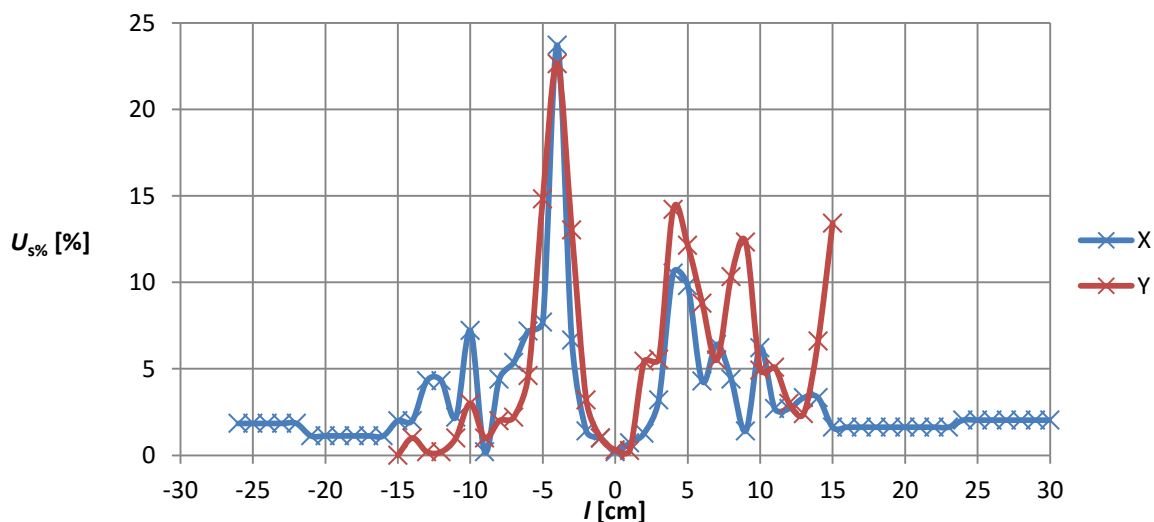
Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]
-26	0.00	0	80.16	-15	44.89	1	80.96
-21	9.22	1	80.36	-14	45.89	2	86.41
-16	14.83	2	81.08	-13	46.09	3	91.96
-14	18.84	3	82.36	-12	46.29	4	77.76
-12	27.45	4	85.57	-11	47.29	5	65.61
-11	31.26	5	75.03	-10	50.30	6	56.81
-10	33.47	6	65.21	-9	51.30	7	51.30
-9	40.68	7	60.92	-8	53.31	8	40.98
-8	40.88	8	54.51	-7	55.51	9	28.66
-7	45.29	9	50.10	-6	60.12	10	23.73
-6	50.66	10	48.70	-5	74.95	11	18.64
-5	57.84	11	42.48	-4	97.60	12	15.63
-4	65.53	13	37.07	-3	84.57	13	13.23
-3	89.24	15	30.42	-2	81.36	14	6.61
-2	82.57	23	19.04	-1	80.36	15	20.04
-1	81.16	30	4.81	0	80.68		



Obrázek 5 – Rozložení potenciálu ekvipotenciálního kruhu v poměrných hodnotách

Tabulka 11 – Měřené hodnoty krokového napětí v okolí ekvipotenciálního kruhu

Osa X				Osa Y			
l [cm]	$U_s$ [V]	l [cm]	$U_s$ [V]	l [cm]	$U_s$ [V]	l [cm]	$U_s$ [V]
-26	0.92	3	1.60	-15	0.00	1	0.14
-25	0.92	4	5.26	-14	0.50	2	2.72
-24	0.92	5	4.90	-13	0.10	3	2.77
-23	0.92	6	2.14	-12	0.10	4	7.09
-22	0.92	7	3.20	-11	0.50	5	6.06
-21	0.56	8	2.20	-10	1.50	6	4.39
-20	0.56	9	0.70	-9	0.50	7	2.75
-19	0.56	10	3.10	-8	1.00	8	5.15
-18	0.56	11	1.35	-7	1.10	9	6.15
-17	0.56	12	1.35	-6	2.30	10	2.46
-16	0.56	13	1.66	-5	7.40	11	2.54
-15	1.00	14	1.66	-4	11.30	12	1.50
-14	1.00	15	0.81	-3	6.50	13	1.20
-13	2.15	16	0.81	-2	1.60	14	3.30
-12	2.15	17	0.81	-1	0.50	15	13.30
-11	1.10	18	0.81	0	0.16		
-10	3.60	19	0.81				
-9	0.10	20	0.81				
-8	2.20	21	0.81				
-7	2.68	22	0.81				
-6	3.58	23	0.81				
-5	3.84	24	1.01				
-4	11.83	25	1.01				
-3	3.33	26	1.01				
-2	0.70	27	1.01				
-1	0.50	28	1.01				
0	0.10	29	1.01				
1	0.36	30	1.01				
2	0.64						



Obrázek 6 – Krokové napětí v okolí ekvipotenciálního kruhu v poměrných hodnotách

Tabulka 12 – Krokové napětí v okolí ekvipotenciálního kruhu v poměrných hodnotách

Osa X				Osa Y			
l [cm]	$U_{s\%}$ [%]	l [cm]	$U_{s\%}$ [%]	l [cm]	$U_{s\%}$ [%]	l [cm]	$U_{s\%}$ [%]
-26	1.84	3	3.21	-15	0.00	1	0.28
-25	1.84	4	10.54	-14	1.00	2	5.45
-24	1.84	5	9.82	-13	0.20	3	5.55
-23	1.84	6	4.29	-12	0.20	4	14.21
-22	1.84	7	6.41	-11	1.00	5	12.14
-21	1.12	8	4.41	-10	3.01	6	8.80
-20	1.12	9	1.40	-9	1.00	7	5.51
-19	1.12	10	6.21	-8	2.00	8	10.32
-18	1.12	11	2.71	-7	2.20	9	12.32
-17	1.12	12	2.71	-6	4.61	10	4.93
-16	1.12	13	3.33	-5	14.83	11	5.09
-15	2.00	14	3.33	-4	22.65	12	3.01
-14	2.00	15	1.63	-3	13.03	13	2.40
-13	4.31	16	1.63	-2	3.21	14	6.61
-12	4.31	17	1.63	-1	1.00	15	13.43
-11	2.20	18	1.63	0	0.32		
-10	7.21	19	1.63				
-9	0.20	20	1.63				
-8	4.41	21	1.63				
-7	5.37	22	1.63				
-6	7.17	23	1.63				
-5	7.70	24	2.03				
-4	23.71	25	2.03				
-3	6.67	26	2.03				
-2	1.40	27	2.03				
-1	1.00	28	2.03				
0	0.20	29	2.03				
1	0.72	30	2.03				
2	1.28						

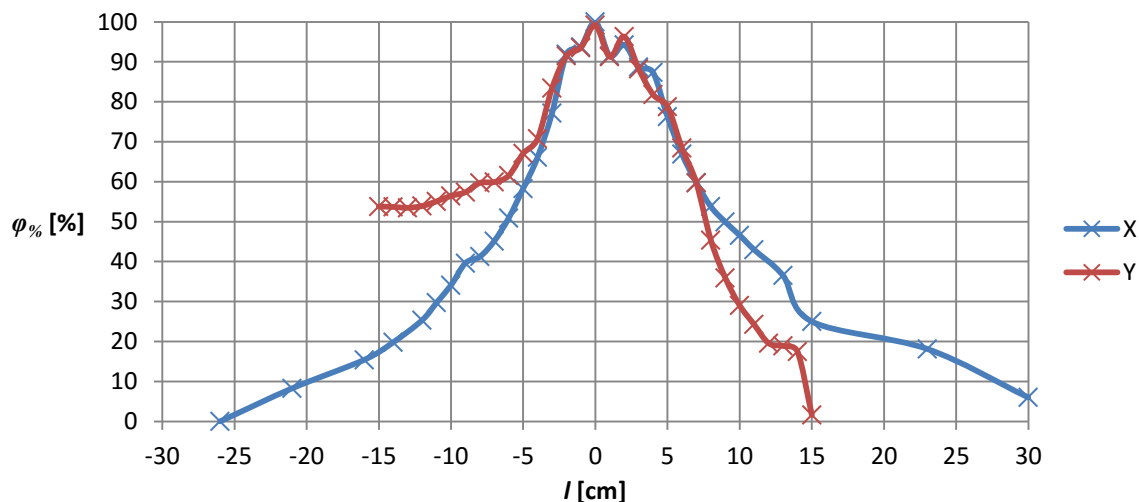
## Dva ekvipotenciální kruhy

Tabulka 13 – Měřené hodnoty rozložení potenciálu dvou ekvipotenciálních kruhů

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]
-26	43.40	0	0.00	-15	20.06	1	3.80
-21	39.80	1	3.70	-14	20.10	2	1.60
-16	36.70	2	2.50	-13	20.20	3	5.10
-14	34.80	3	4.90	-12	20.00	4	7.90
-12	32.40	4	5.50	-11	19.50	5	9.20
-11	30.50	5	10.30	-10	18.90	6	13.70
-10	28.60	6	14.36	-9	18.50	7	17.50
-9	26.20	7	17.47	-8	17.50	8	23.70
-8	25.50	8	20.07	-7	17.40	9	27.80
-7	23.80	9	21.73	-6	16.70	10	30.80
-6	21.30	10	23.18	-5	14.30	11	32.87
-5	18.10	11	24.75	-4	12.70	12	34.90
-4	14.70	13	27.55	-3	7.20	13	35.20
-3	9.90	15	32.55	-2	3.70	14	35.80
-2	3.50	20	35.53	-1	2.80	15	42.70
-1	2.70	25	40.80	0	0.36		

Tabulka 14 – Poměrné hodnoty rozložení potenciálu dvou ekvipotenciálních kruhů

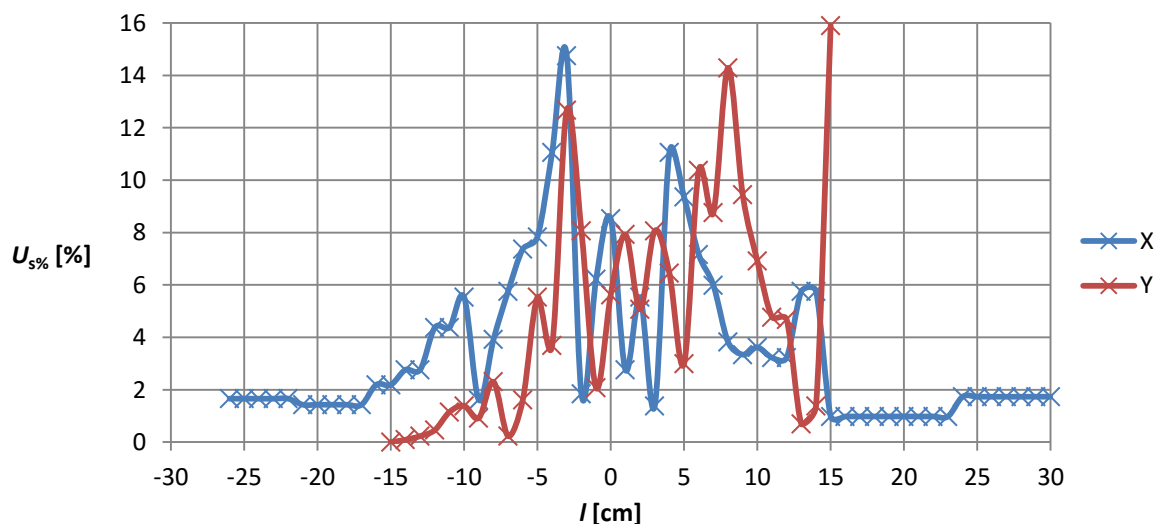
Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]
-26	0.00	0	100.00	-15	53.78	1	91.24
-21	8.29	1	91.47	-14	53.69	2	96.31
-16	15.44	2	94.24	-13	53.46	3	88.25
-14	19.82	3	88.71	-12	53.92	4	81.80
-12	25.35	4	87.33	-11	55.07	5	78.80
-11	29.72	5	76.27	-10	56.45	6	68.43
-10	34.10	6	66.91	-9	57.37	7	59.68
-9	39.63	7	59.75	-8	59.68	8	45.39
-8	41.24	8	53.76	-7	59.91	9	35.94
-7	45.16	9	49.93	-6	61.52	10	29.03
-6	50.92	10	46.59	-5	67.05	11	24.26
-5	58.29	11	42.97	-4	70.74	12	19.59
-4	66.13	13	36.52	-3	83.41	13	18.89
-3	77.19	15	25.00	-2	91.47	14	17.51
-2	91.94	23	18.13	-1	93.55	15	1.61
-1	93.78	30	5.99	0	99.17		



Obrázek 7 – Rozložení potenciálu dvou ekvipotenciálních kruhů v poměrných hodnotách

Tabulka 15 – Měřené hodnoty krokového napětí v okolí dvou ekvipotenciálních kruhů

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]
-26	0.72	3	0.60	-15	0.00	1	3.44
-25	0.72	4	4.80	-14	0.04	2	2.20
-24	0.72	5	4.06	-13	0.10	3	3.50
-23	0.72	6	3.11	-12	0.20	4	2.80
-22	0.72	7	2.60	-11	0.50	5	1.30
-21	0.62	8	1.66	-10	0.60	6	4.50
-20	0.62	9	1.45	-9	0.40	7	3.80
-19	0.62	10	1.57	-8	1.00	8	6.20
-18	0.62	11	1.40	-7	0.10	9	4.10
-17	0.62	12	1.40	-6	0.70	10	3.00
-16	0.95	13	2.50	-5	2.40	11	2.07
-15	0.95	14	2.50	-4	1.60	12	2.03
-14	1.20	15	0.43	-3	5.50	13	0.30
-13	1.20	16	0.43	-2	3.50	14	0.60
-12	1.90	17	0.43	-1	0.90	15	6.90
-11	1.90	18	0.43	0	2.44		
-10	2.40	19	0.43				
-9	0.70	20	0.43				
-8	1.70	21	0.43				
-7	2.50	22	0.43				
-6	3.20	23	0.43				
-5	3.40	24	0.75				
-4	4.80	25	0.75				
-3	6.40	26	0.75				
-2	0.80	27	0.75				
-1	2.70	28	0.75				
0	3.7	29	0.75				
1	1.2	30	0.75				
2	2.4						



Obrázek 8 – Krokové napětí v okolí dvou ekvipotenciálních kruhů v poměrných hodnotách

Tabulka 16 – Krokové napětí v okolí dvou ekvipotenciálních kruhů v poměrných hodnotách

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]
-26	1.66	3	1.38	-15	0.00	1	7.93
-25	1.66	4	11.06	-14	0.09	2	5.07
-24	1.66	5	9.35	-13	0.23	3	8.06
-23	1.66	6	7.17	-12	0.46	4	6.45
-22	1.66	7	5.99	-11	1.15	5	3.00
-21	1.43	8	3.82	-10	1.38	6	10.37
-20	1.43	9	3.34	-9	0.92	7	8.76
-19	1.43	10	3.62	-8	2.30	8	14.29
-18	1.43	11	3.23	-7	0.23	9	9.45
-17	1.43	12	3.23	-6	1.61	10	6.91
-16	2.19	13	5.76	-5	5.53	11	4.77
-15	2.19	14	5.76	-4	3.69	12	4.68
-14	2.76	15	0.98	-3	12.67	13	0.69
-13	2.76	16	0.98	-2	8.06	14	1.38
-12	4.38	17	0.98	-1	2.07	15	15.90
-11	4.38	18	0.98	0	5.62		
-10	5.53	19	0.98				
-9	1.61	20	0.98				
-8	3.92	21	0.98				
-7	5.76	22	0.98				
-6	7.37	23	0.98				
-5	7.83	24	1.73				
-4	11.06	25	1.73				
-3	14.75	26	1.73				
-2	1.84	27	1.73				
-1	6.22	28	1.73				
0	8.53	29	1.73				
1	2.76	30	1.73				
2	5.53						

## Dva zemnicí pásy

Tabulka 17 – Měřené hodnoty rozložení potenciálu dvou zemnicích pásků

Osa X				Osa Y1				Osa Y2			
l [cm]	φ [V]	l [cm]	φ [V]	l [cm]	φ [V]	l [cm]	φ [V]	l [cm]	φ [V]	l [cm]	φ [V]
-26	40.60	0	0.00	-15	30.10	1	16.05	-15	34.11	1	39.15
-21	37.90	1	7.20	-14	29.70	2	19.80	-14	33.41	2	41.70
-16	33.80	2	7.72	-13	29.40	3	22.72	-13	34.20	3	43.30
-14	32.08	3	6.84	-12	28.90	4	27.80	-12	34.26	4	44.10
-12	26.70	4	7.32	-11	29.20	5	29.76	-11	34.85	5	45.50
-11	19.90	5	8.32	-10	28.74	6	31.32	-10	34.61	6	47.10
-10	18.10	6	7.68	-9	28.30	7	35.30	-9	34.42	7	48.40
-9	14.10	7	7.03	-8	28.10	8	39.45	-8	34.25	8	49.50
-8	9.20	8	6.80	-7	27.66	9	42.20	-7	33.79	9	50.50
-7	7.40	9	5.60	-6	27.10	10	43.50	-6	35.67	10	52.10
-6	9.80	10	11.60	-5	26.50	11	44.80	-5	35.79	11	52.90
-5	9.04	11	17.20	-4	24.70	12	45.20	-4	36.31	12	53.80
-4	9.19	13	22.21	-3	22.30	13	45.80	-3	36.36	13	55.60
-3	4.71	15	28.28	-2	18.60	14	47.30	-2	36.93	14	56.80
-2	6.50	23	32.70	-1	14.78	15	50.40	-1	37.34	15	58.00
-1	5.90	30	38.90	0	4.50			0	37.71		

Tabulka 18 – Poměrné hodnoty rozložení potenciálu dvou zemnicích pásků

Osa X				Osa Y1				Osa Y2			
l [cm]	φ% [%]	l [cm]	φ% [%]	l [cm]	φ% [%]	l [cm]	φ% [%]	l [cm]	φ% [%]	l [cm]	φ% [%]
-26	0.00	0	100.00	-15	25.86	1	60.47	-15	15.99	1	3.57
-21	6.65	1	82.27	-14	26.85	2	51.23	-14	17.71	2	2.71
-16	16.75	2	80.99	-13	27.59	3	44.04	-13	15.76	3	6.65
-14	20.99	3	83.15	-12	28.82	4	31.53	-12	15.62	4	8.62
-12	34.24	4	81.97	-11	28.08	5	26.70	-11	14.16	5	12.07
-11	50.99	5	79.51	-10	29.21	6	22.86	-10	14.75	6	16.01
-10	55.42	6	81.08	-9	30.30	7	13.05	-9	15.22	7	19.21
-9	65.27	7	82.68	-8	30.79	8	2.83	-8	15.64	8	21.92
-8	77.34	8	83.25	-7	31.87	9	3.94	-7	16.77	9	24.38
-7	81.77	9	86.21	-6	33.25	10	7.14	-6	12.14	10	28.33
-6	75.86	10	71.43	-5	34.73	11	10.34	-5	11.85	11	30.30
-5	77.73	11	57.64	-4	39.16	12	11.33	-4	10.57	12	32.51
-4	77.36	13	45.30	-3	45.07	13	12.81	-3	10.44	13	36.95
-3	88.40	15	30.34	-2	54.19	14	16.50	-2	9.04	14	39.90
-2	83.99	23	19.46	-1	63.60	15	24.14	-1	8.03	15	42.86
-1	85.47	30	4.19	0	88.92			0	7.12		





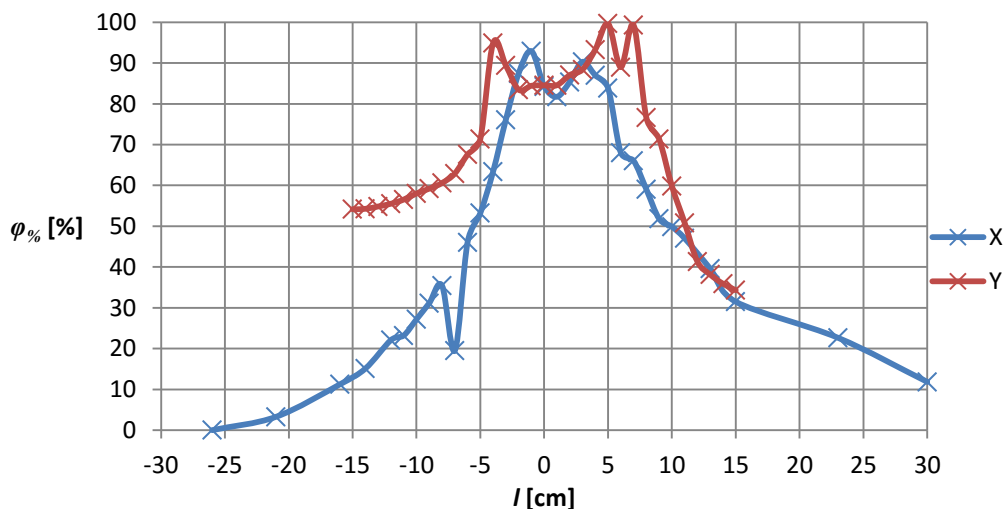
## Model zemnicí soustavy zděné kioskové transformovny

Tabulka 21 – Měřené hodnoty rozložení potenciálu Zemniče 1

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]	$l$ [cm]	$\varphi$ [V]
-26	49.00	0	7.70	-15	22.46	1	7.56
-21	47.40	1	8.95	-14	22.41	2	6.35
-16	43.50	2	7.17	-13	22.13	3	5.68
-14	41.60	3	4.75	-12	21.80	4	3.29
-12	38.18	4	6.38	-11	21.30	5	0.16
-11	37.63	5	7.91	-10	20.57	6	5.40
-10	35.69	6	15.67	-9	19.99	7	0.35
-9	33.74	7	16.63	-8	19.31	8	11.46
-8	31.64	8	20.07	-7	18.17	9	14.03
-7	39.46	9	23.60	-6	15.88	10	19.68
-6	26.43	10	24.56	-5	14.01	11	24.10
-5	22.92	11	25.96	-4	2.50	12	28.76
-4	17.94	13	29.60	-3	5.19	13	30.31
-3	11.70	15	33.57	-2	8.10	14	31.41
-2	6.14	23	37.90	-1	7.63	15	32.19
-1	3.47	30	43.20	0	7.58		

Tabulka 22 – Poměrné hodnoty rozložení potenciálu Zemniče 1

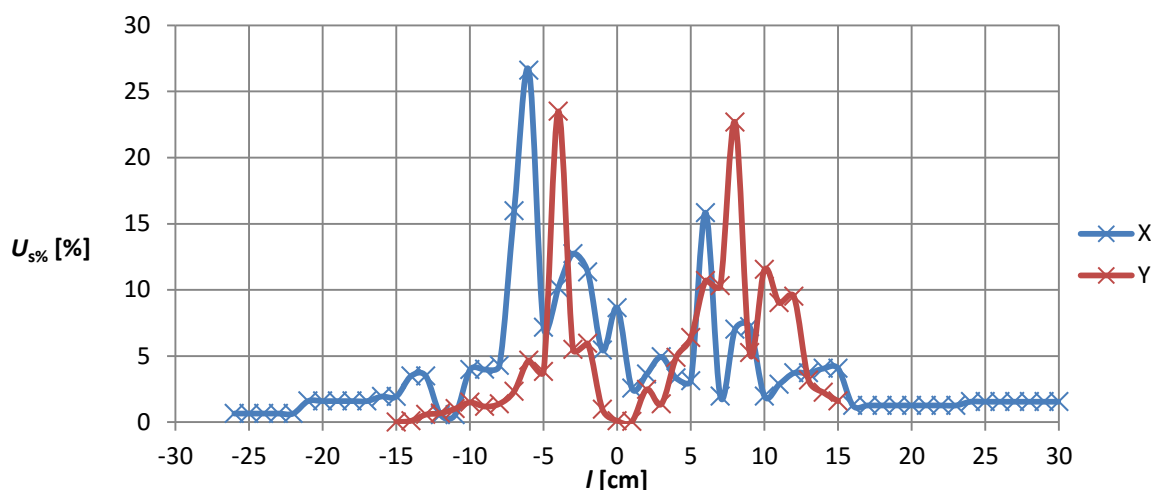
Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	$l$ [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]
-26	0.00	0	84.29	-15	54.16	1	84.57
-21	3.27	1	81.73	-14	54.27	2	87.04
-16	11.22	2	85.37	-13	54.84	3	88.41
-14	15.10	3	90.31	-12	55.51	4	93.29
-12	22.08	4	86.98	-11	56.53	5	99.67
-11	23.20	5	83.86	-10	58.02	6	88.98
-10	27.16	6	68.02	-9	59.20	7	99.29
-9	31.14	7	66.06	-8	60.59	8	76.61
-8	35.43	8	59.04	-7	62.92	9	71.37
-7	19.47	9	51.84	-6	67.59	10	59.84
-6	46.06	10	49.88	-5	71.41	11	50.82
-5	53.22	11	47.02	-4	94.90	12	41.31
-4	63.39	13	39.59	-3	89.41	13	38.14
-3	76.12	15	31.49	-2	83.47	14	35.90
-2	87.47	23	22.65	-1	84.43	15	34.31
-1	92.92	30	11.84	0	84.53		



Obrázek 11 – Rozložení potenciálu Zemniče 1 v poměrných hodnotách

Tabulka 23 – Měřené hodnoty krokového napětí v okolí Zemniče 1

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]
-26	0.32	3	2.42	-15	0.00	1	0.02
-25	0.32	4	1.63	-14	0.05	2	1.21
-24	0.32	5	1.53	-13	0.28	3	0.67
-23	0.32	6	7.76	-12	0.33	4	2.39
-22	0.32	7	0.96	-11	0.50	5	3.13
-21	0.78	8	3.44	-10	0.73	6	5.24
-20	0.78	9	3.53	-9	0.58	7	5.05
-19	0.78	10	0.96	-8	0.68	8	11.11
-18	0.78	11	1.40	-7	1.14	9	2.57
-17	0.78	12	1.82	-6	2.29	10	5.65
-16	0.95	13	1.82	-5	1.87	11	4.42
-15	0.95	14	1.99	-4	11.51	12	4.66
-14	1.71	15	1.99	-3	2.69	13	1.55
-13	1.71	16	0.62	-2	2.91	14	1.10
-12	0.27	17	0.62	-1	0.47	15	0.78
-11	0.27	18	0.62	0	0.05		
-10	1.94	19	0.62				
-9	1.95	20	0.62				
-8	2.10	21	0.62				
-7	7.82	22	0.62				
-6	13.03	23	0.62				
-5	3.51	24	0.76				
-4	4.98	25	0.76				
-3	6.24	26	0.76				
-2	5.56	27	0.76				
-1	2.67	28	0.76				
0	4.23	29	0.76				
1	1.25	30	0.76				
2	1.78						



Obrázek 12 – Krokové napětí v okolí Zemniče 1 v poměrných hodnotách

Tabulka 24 – Krokové napětí v okolí Zemniče 1 v poměrných hodnotách

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]
-26	0.65	3	4.94	-15	0.00	1	0.04
-25	0.65	4	3.33	-14	0.10	2	2.47
-24	0.65	5	3.12	-13	0.57	3	1.37
-23	0.65	6	15.84	-12	0.67	4	4.88
-22	0.65	7	1.96	-11	1.02	5	6.39
-21	1.59	8	7.02	-10	1.49	6	10.69
-20	1.59	9	7.20	-9	1.18	7	10.31
-19	1.59	10	1.96	-8	1.39	8	22.67
-18	1.59	11	2.86	-7	2.33	9	5.24
-17	1.59	12	3.71	-6	4.67	10	11.53
-16	1.94	13	3.71	-5	3.82	11	9.02
-15	1.94	14	4.05	-4	23.49	12	9.51
-14	3.49	15	4.05	-3	5.49	13	3.16
-13	3.49	16	1.26	-2	5.94	14	2.24
-12	0.56	17	1.26	-1	0.96	15	1.59
-11	0.56	18	1.26	0	0.10		
-10	3.96	19	1.26				
-9	3.98	20	1.26				
-8	4.29	21	1.26				
-7	15.96	22	1.26				
-6	26.59	23	1.26				
-5	7.16	24	1.55				
-4	10.16	25	1.55				
-3	12.73	26	1.55				
-2	11.35	27	1.55				
-1	5.45	28	1.55				
0	8.63	29	1.55				
1	2.55	30	1.55				
2	3.63						

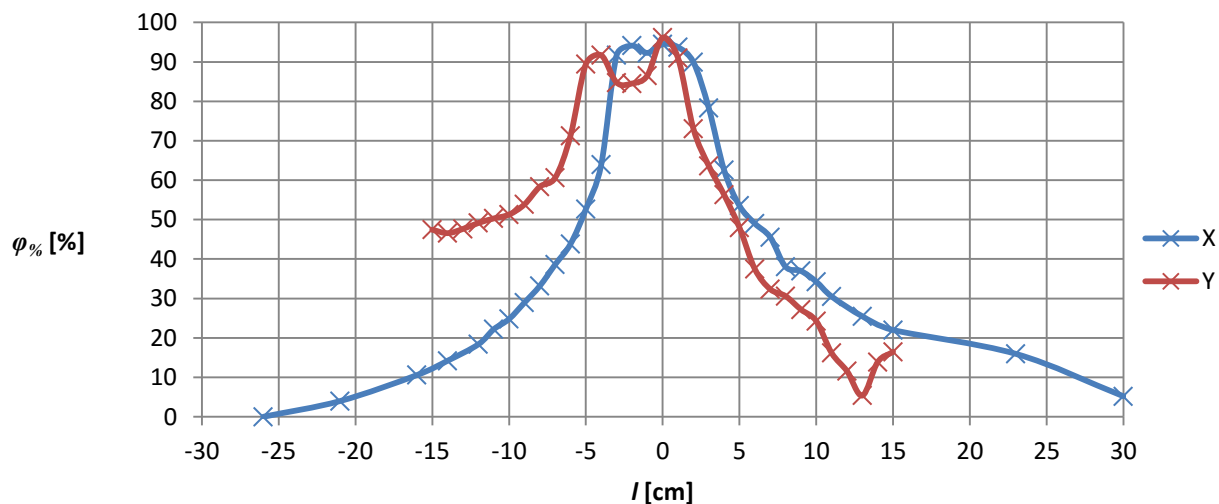
## Model zemnicí soustavy kioskové blokové trafostanice

Tabulka 25 – Měřené hodnoty rozložení potenciálu Zemniče 2

Osa X				Osa Y			
<i>l</i> [cm]	$\varphi$ [V]	<i>l</i> [cm]	$\varphi$ [V]	<i>l</i> [cm]	$\varphi$ [V]	<i>l</i> [cm]	$\varphi$ [V]
-26	57.70	0	3.18	-15	30.33	1	5.21
-21	55.40	1	3.61	-14	30.83	2	15.55
-16	51.60	2	5.81	-13	30.21	3	20.98
-14	49.50	3	12.50	-12	29.34	4	25.21
-12	47.10	4	21.60	-11	28.68	5	30.02
-11	44.90	5	26.82	-10	28.11	6	36.08
-10	43.40	6	29.42	-9	26.63	7	39.03
-9	41.00	7	31.42	-8	24.03	8	40.04
-8	38.56	8	35.75	-7	22.73	9	42.00
-7	35.42	9	36.36	-6	16.57	10	43.70
-6	32.42	10	37.93	-5	6.10	11	48.36
-5	27.32	11	40.10	-4	4.79	12	51.02
-4	20.81	13	43.00	-3	8.79	13	60.80
-3	4.80	15	45.00	-2	8.93	14	65.70
-2	3.39	20	48.50	-1	7.78	15	67.20
-1	4.45	25	54.70	0	2.22		

Tabulka 26 – Poměrné hodnoty rozložení potenciálu Zemniče 2

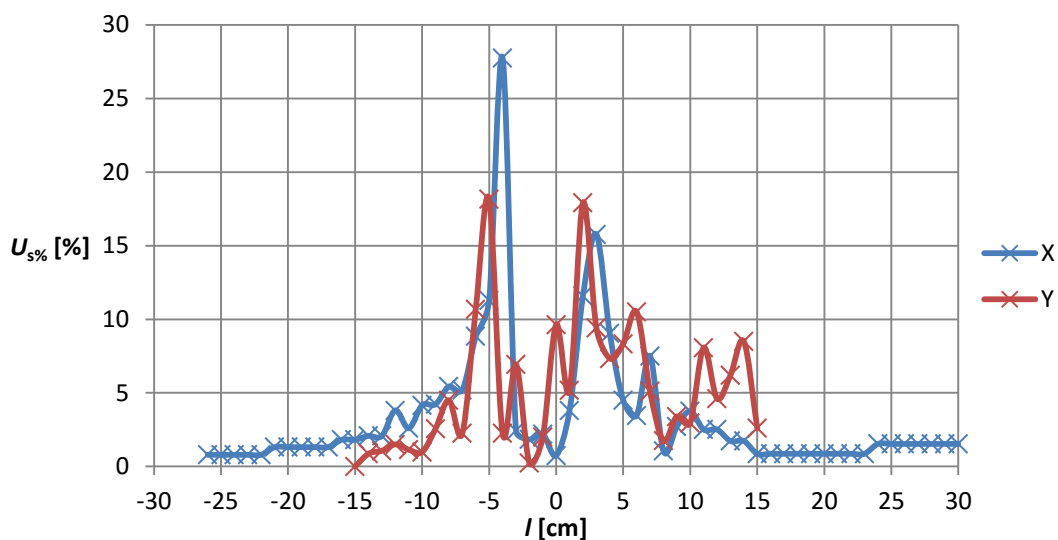
Osa X				Osa Y			
<i>l</i> [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	<i>l</i> [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	<i>l</i> [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]	<i>l</i> [cm]	$\varphi_{\%}$ [%]
-26	0.00	0	94.49	-15	47.44	1	90.97
-21	3.99	1	93.74	-14	46.57	2	73.05
-16	10.57	2	89.93	-13	47.64	3	63.64
-14	14.21	3	78.34	-12	49.15	4	56.31
-12	18.37	4	62.56	-11	50.29	5	47.97
-11	22.18	5	53.52	-10	51.28	6	37.47
-10	24.78	6	49.01	-9	53.85	7	32.36
-9	28.94	7	45.55	-8	58.35	8	30.61
-8	33.17	8	38.04	-7	60.61	9	27.21
-7	38.61	9	36.98	-6	71.28	10	24.26
-6	43.81	10	34.26	-5	89.43	11	16.19
-5	52.65	11	30.50	-4	91.70	12	11.58
-4	63.93	13	25.48	-3	84.77	13	5.37
-3	91.68	15	22.01	-2	84.52	14	13.86
-2	94.12	23	15.94	-1	86.52	15	16.46
-1	92.29	30	5.20	0	96.15		



Obrázek 13 – Rozložení potenciálu Zemniče 2 v poměrných hodnotách

Tabulka 27 – Měřené hodnoty krokového napětí v okolí Zemniče 2

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]	$l$ [cm]	$U_s$ [V]
-26	0.46	3	9.10	-15	0.00	1	2.99
-25	0.46	4	5.22	-14	0.50	2	10.34
-24	0.46	5	2.60	-13	0.62	3	5.43
-23	0.46	6	2.00	-12	0.87	4	4.23
-22	0.46	7	4.33	-11	0.66	5	4.81
-21	0.76	8	0.61	-10	0.57	6	6.06
-20	0.76	9	1.57	-9	1.48	7	2.95
-19	0.76	10	2.17	-8	2.60	8	1.01
-18	0.76	11	1.45	-7	1.30	9	1.96
-17	0.76	12	1.45	-6	6.16	10	1.70
-16	1.05	13	1.00	-5	10.47	11	4.66
-15	1.05	14	1.00	-4	1.31	12	2.66
-14	1.20	15	0.50	-3	4.00	13	9.78
-13	1.20	16	0.50	-2	0.14	14	4.90
-12	2.20	17	0.50	-1	1.15	15	1.50
-11	1.50	18	0.50	0	5.56		
-10	2.40	19	0.50				
-9	2.44	20	0.50				
-8	3.14	21	0.50				
-7	3.00	22	0.50				
-6	5.10	23	0.50				
-5	6.51	24	0.89				
-4	16.01	25	0.89				
-3	1.41	26	0.89				
-2	1.06	27	0.89				
-1	1.27	28	0.89				
0	0.43	29	0.89				
1	2.20	30	0.89				
2	6.69						



Obrázek 14 – Krokové napětí v okolí Zemniče 2 v poměrných hodnotách

Tabulka 28 – Krokové napětí v okolí Zemniče 2 v poměrných hodnotách

Osa X				Osa Y			
$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]	$l$ [cm]	$U_{s\%}$ [%]
-26	0.80	3	15.77	-15	0.00	1	5.18
-25	0.80	4	9.05	-14	0.87	2	17.92
-24	0.80	5	4.51	-13	1.07	3	9.41
-23	0.80	6	3.47	-12	1.51	4	7.33
-22	0.80	7	7.50	-11	1.14	5	8.34
-21	1.32	8	1.06	-10	0.99	6	10.50
-20	1.32	9	2.72	-9	2.56	7	5.11
-19	1.32	10	3.76	-8	4.51	8	1.75
-18	1.32	11	2.51	-7	2.25	9	3.40
-17	1.32	12	2.51	-6	10.68	10	2.95
-16	1.82	13	1.73	-5	18.15	11	8.08
-15	1.82	14	1.73	-4	2.27	12	4.61
-14	2.08	15	0.87	-3	6.93	13	6.20
-13	2.08	16	0.87	-2	0.24	14	8.49
-12	3.81	17	0.87	-1	1.99	15	2.60
-11	2.60	18	0.87	0	9.64		
-10	4.16	19	0.87				
-9	4.23	20	0.87				
-8	5.44	21	0.87				
-7	5.20	22	0.87				
-6	8.84	23	0.87				
-5	11.28	24	1.54				
-4	27.75	25	1.54				
-3	2.44	26	1.54				
-2	1.84	27	1.54				
-1	2.20	28	1.54				
0	0.74	29	1.54				
1	3.81	30	1.54				
2	11.59						

