

# 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

# PRAVDĚPODOBNOSTNÍ PŘÍSTUP PRO HODNOCENÍ ZEMNÍCÍCH SOUSTAV

PROBABILISTIC APPROACH FOR ASSESSMENT OF EARTHING SYSTEM DESIGN

#### DIZERTAČNÍ PRÁCE DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

Ing. Václav Vyčítal

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

#### BRNO 2020

Bibliografická citace práce:

VYČÍTAL, V. Pravděpodobnostní přístup pro hodnocení zemnících soustav. Disertační práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2020, 212 stran.

### PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval mému školiteli doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. za jeho vedení během celé doby mého studia. Dále bych rád poděkoval Ing. Davidu Topolánkovi Ph.D za jeho četné rady a spolupráci k tématu mé disertační práce. Zároveň bych zde rád poděkoval i ostatním zaměstnancům Ústavu elektroenergetiky za jejich cenné rady, sdílení znalostí a za vytvoření vhodného pracovního prostředí, které mě inspirovalo k práci během mého doktorského studia. Na tomto místě bych také chtěl poděkovat mé rodině za jejich trpělivost a podporu během mého studia.

### ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

"Prohlašuji, že svou disertační práci na téma Pravděpodobnostní přístup pro hodnocení zemnících soustav jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 2.3.2020

.....

#### Abstrakt

Disertační práce se zabývá aplikací pravděpodobnostního přístupu pro vyhodnocení bezpečnosti zemnících soustav v distribučních sítích, především pak zemničů se společným zemněním vysokého a nízkého napětí, jako jsou případy distribučních trafostanic VN/NN. Jelikož v těchto případech dochází k ohrožení i laické veřejnosti v důsledku zanesení potenciálu do sítí nízkého napětí, byly tak vydefinovány očekávatelné dotykové scénáře a byly jim stanoveny očekávatelné míry rizika. Na základě získaných výsledků je pak zřejmé, že použití pravděpodobnostního přístupu se v kontextu těchto sítí může jevit jako vhodnější než současný deterministický přístup nejhoršího scénáře. Pro naplnění cílů disertační práce byl také proveden rozbor současných pravděpodobnostních přístupů, na jehož základě byly navrženy některá další zjednodušení použitelná při stanovování rizika. Ukazuje se například, že detailní modelování odporu lidského těla není úplně nezbytné, pokud se např. použije odpor pro 50 % populace a křivky fibrilace c3 a c4. Pro stanovení případné nejistoty spočteného rizika při aplikaci pravděpodobnostního přístupu na zemniče v distribučních soustavách pak byla také nemalá část práce věnována nepřesnostem modelování a výpočtu zemničů. Vliv nevhodného modelování zemničů společně s případnými dalšími parametry byl následně zkoumán v provedené citlivostní analýze. Z výsledků se jeví, že nevhodné modelování může vést k poddimenzování rizika o přibližně 40 % (tj. přibližně polovina řádu). Naproti tomu variace jiných dalších parametrů mající přímí vliv na pravděpodobnost fibrilace může způsobit nejistotu určení rizika až o jednotky řádů.

**KLÍČOVÁ SLOVA**: zemnění; bezpečnost; pravděpodobnostní vyhodnocení; riziko; distribuční síť; modelování zemničů; citlivostní analýza;

#### Abstract

This dissertation thesis deals with application of probabilistic approach to assessment of earthing system safety in distribution networks, especially for cases with common earthing of high and low voltage side of distribution transformers HV/LV. In these cases, the increased potential during fault might be transferred from high voltage to low voltage network and thus the individuals from public can be exposed to increased risk. Thus, for these cases were in this thesis defined expectable touch scenarios together with the resulting risk imposed on individuals from the public. Based on the results it seems that adoption of probabilistic approach for these cases of earthing systems might be more suitable compared to the conventional deterministic worst case approach. In accordance to the aims of the thesis, a thorough analysis of currently adopted probabilistic approaches was carried out as well and it was pointed out to some new possible simplifications in the adopted probabilistic based methodologies. For example, it seems that appropriate modelling of human body resistance by the full lognormal distribution is not completely necessary and similar results can be obtained when only the resistance for 50 % of population together with c3 and c4 fibrillation curves are used. Much of the work was also devoted to the determination of possible uncertainty of calculated risk of evaluated earthing system, especially due to inappropriate modelling of earthing system. The appropriateness of different earthing system modelling methods together with other parameters on the value of calculated risk was investigated through conducting sensitivity analysis. Based on the analysis results it seems, that due to using more, or less simplified modelling method, a possible underrating in the resulting risk of about 40 % (about half an order/decade) is expectable. On the other hand, the change of parameters related directly to calculation of fibrillation probability seems to exhibit greater change in calculated risk by up to units of orders/decades.

#### **KEY WORDS**:

earthing; safety; probabilistic assessment; risk; distribution network; earthing system modelling; sensitivity analysis;

### OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	15
1 ÚVOD	19
2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	21
3 CÍLE DISERTACE	
4 POSTUP A NAPLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	
5 TOK PROUDU ZEMÍ A MODELOVÁNÍ ZEMNIČŮ	
5.1 Zjednodušené vztahy a koeficienty využití	41
5.1.1 RÜDENBERG	41
5.1.2 DWIGHT	45
5.1.3 Osolsobě	47
5.1.4 EN 50522	
5.1.5 KOEFICIENTY VYUZITI	49
5.1.0 SLOZENI PUDY A WENNEROVO MERENI	
5.2 POKROCILEJSI METODY RESENI UZEMNENI	
5.2.1 ANSOFT MAXWELL – NUMERICKE RESENI	87 92
5.3 SROVNÁNÍ VÝPOČTOVÝCH METOD	
5.3.1 Zjednodušené vztahy	
5.3.2 Koeficienty využití	104
5.3.3 Ansoft Maxwell vs Dawalibi	106
5.4 Shrnutí a diskuze modelování zemničů	114
5.4.1 Zdroje chyb	114
5.4.2 Kvantifikace chyb	115
5.4.3 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ A NAVAZUJÍCÍ VÝZKUM	117
5.4.4 VLIV ZPŮSOBU MODELOVÁNÍ ZEMNIČE A PRAVDĚPODOBNOSTNÍ PŘÍSTUP	118
6 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ PŘÍSTUP PRO NÁVRH ZEMNIČŮ	119
6.1 FILOZOFIE RIZIKA	122
6.2 Odpor lidského těla	128
6.3 Pravděpodobnost fibrilace	
6.4 AUTOREM REPRODUKOVANÝ PŘÍSTUP	140
6.4.1 Připouštěná míra rizika současných křivek dovolených dotykových na	APĚTÍ142
6.4.2 Srovnání Erisk s programem Argonium a vliv modelování odporu lidsk	ÉHO TĚLA
A ODPORU OBUVI JAKO PROSTÉ HODNOTY	147
6.4.3 Shrnutí navržených zjednodušení	156
6.5 PRAVDĚPODOBNOST KOINCIDENCE	
6.6 APLIKACE PRAVDĚPODOBNOSTNÍHO PŘÍSTUPU V DISTRIBUČNÍCH SOUSTAVÁCH	159

6.6.1 Model distribuční sítě - případová studie	161
6.6.2 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA PRAVDĚPODOBNOSTNÍHO PŘÍSTUPU	168
6.6.3 Shrnutí	174
7 ZÁVĚR	176
7.1 NÁMĚTY PRO NAVAZUJÍCÍ POSTUP	177
8 PŘÍLOHA A	179
9 PŘÍLOHA B	
POUŽITÁ LITERATURA	203
PUBLIKACE AUTORA	211

# SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Limitní křivky proudu podle [4] c1-c4 a podle [6] 150 a 170, křivky c1-c4 značí limitn hodnoty fibrilace s 0.5, 5, 50 a 95 % pravděpodobnostní, obrázek převzat z [11]22</i>
Obr. 2-2 Diagram návrhu uzemňovacích soustav [2]23
Obr. 2-3 Statistické rozložení velikostí poruchového proudu na přípojnici P při náhodném místo výskytu zkratu při 500 simulacích [14]
Obr. 2-4 Model sítě se zemními lany [19]20
Obr. 2-5 Vlevo vyobrazena část dvojitého paralelního vedení s vyznačením umístění sloupů (tečky, (ne všechny jsou zahrnuty do výpočtu, jen určitý počet na každou stranu od postiženého místa) vpravo funkce hustoty pravděpodobnosti velikosti dotykového napětí pro dva typy zemniče u postiženého sloupu, získaná metodou Monte Carlo [15]20
Obr. 2-6 Metoda Stress-Strength [16]27
<i>Obr. 2-7 Distribuční funkce pravděpodobnosti fibrilace v závislosti na proudu tělem a době trván</i>
Obr. 2-8 Funkce hustoty pravděpodobnosti fibrilace v závislosti na proudu tělem a době trvání 30
Obr. 2-9 Navrhovaný postup pravděpodobnostního přístupu podle [33]
Obr. 5-1 Kulová elektroda zaražená do země, Rüdenberg [52]42
Obr. 5-2 Dvě blízké kulové elektrody v zemi, překresleno podle Rüdenberg [52]43
Obr. 5-3 Potenciál v okolí tyčové elektrody, Rüdenberg [52]44
Obr. 5-4 Válcová elektroda, pohled shora, Dwight [50]40
Obr. 5-5 Soustava, symetricky rozmístěných tyčových zemnících elektrod, podle [65]
<i>Obr. 5-6 Prefabrikovaná transformovna 22/04 kV, PNE 330000-4(4) [64]</i>
Obr. 5-7 Rozložení páskových zemničů pro výpočet koeficientů využití
<i>Obr. 5-8 Rozložení pole v okolí obvodového zemniče doplněného o paprskové zemniče, podle [70] pro stanovení koeficientu využití η<sub>op</sub></i>
Obr. 5-9 Závislost koeficientu využití kombinace obvodového zemniče a 4 páskových zemničů na délce paprsku L pro různé hloubky uložení zemniče a pro různé rozměry obvodového zemniče 54
<i>Obr.</i> 5-10 Koeficient využití tří paprskových zemničů $L = 15$ m, v závislosti na parametrech dvouvrstvého modelu půdy
<i>Obr. 5-11 Koeficient využití čtyř paprskových zemničů</i> $L = 15 m$ , v závislosti na parametreck dvouvrstvého modelu půdy
<i>Obr. 5-12 Závislost koeficientu využití 2 paprskových zemničů na délce paprsku a hloubce jejich uložení</i> $\eta_{pn}$
<i>Obr. 5-13 Závislost koeficientů využití 4 paprskových zemničů na délce paprsku a hloubce jejicl uložení η<sub>pn</sub>56</i>
<i>Obr. 5-14 Stanovení koeficientu využití tyčových zemničů</i> $\eta_t$

Obr. 5-15 Kombinace tyčových zemničů spolu s základovým a obvodovým zemničem doplněn o ekvipotenciální práh	ým 58
Obr. 5-16 Závislost rezistivity půdy na vlhkosti, teplotě a obsahu soli, IEEE 80 [6]	60
Obr. 5-17 Závislost korekčního součinitele pro eliminaci závislosti rezistivity půdy na ročn období, Kočvara [71]	ím 60
Obr. 5-18 Vrstvy podloží, Main Street, Cambridge, Rüdenberg [52]	61
Obr. 5-19 Průběh rezistivity ve vertikálním půdním vrtu, Dawalibi [94]	61
Obr. 5-20 Vrstvy půdy Yellow House Canyon Area, Blumentritt [77]	62
Obr. 5-21 Rozmístění čtyř-elektrodového měření půdy podle Wennera, podle [79]	63
Obr. 5-22 Diagram rozložení Wennerova čtyř-elektrodového měření rezistivity půdy, [78]	64
Obr. 5-23 Horizontálně a vertikálně dělená půdy do vrstev, He [54]	65
Obr. 5-24 Potenciál v bodě M od bodového zdroje v povrchové vrstvě, dvouvrstvý model pů metoda zrcadlení, Dawalibi [57]	ìdy 66
Obr. 5-25 Prostorové vyobrazení zdrojového bodu J a bodu M, Dawalibi [57]	67
Obr. 5-26 Horizontální dvouvrstvý model, Master Curves Dawalibi [94]	68
Obr. 5-27 Hledání překryvu měřených ρ(a) s Masetr Curves, Dawalibi [94]	68
Obr. 5-28 Vykreslení k-křivek pro model půdy 500/1000/1m	69
Obr. 5-29 Zdánlivé rezistivity změřené Wennerovou metodou pro různé rozestupy elektrod p ideální dvouvrstvý horizontální model půdy	oro 70
Obr. 5-30 Model pro měření na dvouvrstvém modelu půdy v programu Ansoft Maxwell spo s vykreslenou sítí konečných prvků [82]	эlи 70
Obr. 5-31 Průběh zdánlivé rezistivity v závislosti na nalezené hloubce a rezistivitách v porovno se změřenými rezistivitami, a) dosaženo dobré shody, b) nedobrá shoda	ání 71
<i>Obr. 5-32 Průběh chybové funkce</i> $\psi$ <i>se zvýrazněnou dobrou shodou,</i> $\rho_1 = 500 \ \Omega m$	72
Obr. 5-33 GUI pro stanovení parametrů půdy podle Tagga, Matyska [82]	73
Obr. 5-34 Průběh změřené zdánlivé rezistivity – Hrušovany nad Jevišovkou	73
Obr. 5-35 Stanovení parametrů půdy – Hrušovany nad Jevišovkou	74
Obr. 5-36 Průběh potenciálu na povrchu země v okolí jednoduchého kruhového zemniče	75
Obr. 5-37 Průběh změřených rezistivit Hrušovany nad Jevišovkou spolu s teoretickým průběh pro model 1500 $\Omega$ m/200 $\Omega$ m/1.5m	ет 76
Obr. 5-38 Model vertikálního modelu půdy s vyznačením rozmístění elektrod Wennerova měře (pohled shora), Kuběna [86]	ení 79
Obr. 5-39 Vertikální model se šikmým dělením (pohled z boku), Kuběna [86]	79
Obr. 5-40 Jednovrstvý model půdy s nehomogenitou, pohled z boku a) a z vrchu b), Kuběna [8	36] 80
Obr. 5-41 Třívrstvý model půdy, pohled z boku, Kuběna [86]	80

Obr.	5-42 Wennerovo měření s přítomností náhodného nefunkčního zemniče
Obr.	5-43 Průběh zdánlivých rezistivit při měření přes náhodný zemnič
Obr.	5-44 Průběh potenciálu v okolí zemniče při přítomnosti náhodného zemniče
Obr.	5-45 Model zemnícího systému, prostorový pohled (a), pohled shora (b), pohled z boku (c)
Obr.	5-46 Vstup proudu u zemniče bez vyvedení zemniče nad povrch země
Obr.	5-47 Průběh potenciálu na povrchu země a vliv nastavení chybové funkce na výsledné vypočtené pole
Obr.	5-48 Model země pro Eddy Currents (a) a DC conduction (b)90
Obr.	5-49 Závislost nastavení analýzy zemniče v programu Ansoft Maxwell (fem) na výslednou hodnotu zemního odporu, pro kruhový zemnič $D = 6.5 m$ , $h = 0.8 m$ , $\rho = 50 \Omega m$ , $R$ poloměr modelu půdy, Rosolsobě hodnota stanovená zjednodušeným vztahem pro kruhový zemnič podle Osolsobě
Obr.	5-50 Zemnící soustava, např. sloupová trafostanice, armovaný betonový stožár a základový zemnič v kombinaci se třemi kruhovými zemniči
Obr.	5-51 Armovaný beton, základový zemnič, vliv počtu tyčí a rezistivity betonu
Obr.	5-52 Průběh potenciálu na vodiči zemniči, Ansoft Maxwell
Obr.	5-53 Bodový zdroj proudu umístěný v dvouvrstvém modelu půdy s vyznačením rozměrových veličin, Dawalibi [94]94
Obr.	5-54 Tyčový zemnič s nekonečným množstvím proudových zdrojů po svojí délce, Dawalibi [94]95
Obr.	5-55 Znázornění segmentace tyčového zemniče, Dawalibi [94]95
Obr.	5-56 Horizontálně umístěný proudový segment, pohled shora, Dawalibi [57]98
Obr.	5-57 Jednoduchý čtvercový zemnič, podle Dawalibi [101]100
Obr.	5-58 Průběh potenciálu pro jednoduchý čtvercový zemnič uložený v různých hloubkách, část 1
Obr.	5-59 Průběh potenciálu pro jednoduchých čtvercový zemnič uložený v různých hloubkách, část 2
Obr.	5-60 Velikost odporu kruhového zemniče v závislosti na jeho hloubce uložení, pro různé metody výpočtu
Obr.	5-61 Velikost odporu kruhového zemniče v závislosti na jeho průměru, pro různé metody výpočtu
Obr.	5-62 Odpor vertikální tyče, rozdíl mezi EN a IEEE, (a) v absolutních hodnotách, (b) v procentních
Obr.	5-63 Porovnání výpočtu podle zjednodušených vztahů a s konstantními koeficienty využití a pokročilejšího výpočtu podle Ansoft Maxwell, podle [75]104

Obr.	5-64 Závislost koeficientů využití kombinací dvou obvodových zemničů (00) a obvodového zemniče a základového zemniče (0s) na průměru kruhového obvodového zemniče, podle [75]
Obr.	5-65 Závislost koeficientů využití dvou obvodových zemničů (00) a obvodového a základového (05) na hloubce uložení vnějšího obvodového zemniče, podle [75]
Obr.	5-66 Rozložení potenciálu v okolí zemniče ve tvaru kříže stanovené programem Ansoft Maxwell
Obr.	5-67 Rozložení potenciálu v okolí zemniče ve tvaru kříže stanovené reprodukovaným analytickým řešením podle Dawalibiho (GEM_soft)107
Obr.	5-68 Porovnání výsledného zemního odporu křížového zemniče stanovené podle programu Ansoft Maxwell a podle Dawalibiho
Obr.	5-69 Průběh potenciálu v okolí mřížového zemniče stanovený Ansoft Maxwell a Dawalibi (GEM soft)
Obr.	5-70 Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibiho metodou a Ansoft Maxwell110
Obr.	5-71 Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibiho metodou a Ansoft Maxwell, pohled z boku z delší strany
Obr.	5-72 Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibiho metodou a Ansoft Maxwell, pohled z boku z kratší strany
Obr.	5-73 Průběh potenciálu v okolí upraveného mřížového zemniče stanovený Ansoft Maxwell a Dawalibi (GEM soft)
Obr.	5-74 Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibi metodou a Ansoft Maxwell112
Obr.	5-75Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibi metodou a Ansoft Maxwell, pohled z boku z delší strany
Obr.	5-76 Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibi metodou a Ansoft Maxwell, pohled z boku z kratší strany
Obr.	6-1 Dovolená dotyková napětí podle EN 50522 pro různě velké přídavné rezistance119
Obr.	6-2 Příklad F-N křivek společenského rizika spolu s vynesenými body (černě) společenského rizika úmrtí následky úrazu elektrického proudu při poruše na uzemňovací soustavě (svislá osa Y představuje pravděpodobnost P úmrtí N a více osob), Argon_EG-0 [37]128
Obr.	6-3 Velikost odporu lidského těla pro velkou dotykovou plochu 10 000 mm <sup>2</sup> v závislosti na dotykovém napětí vyskytující se v populaci s 5, 50 a 95 % zastoupením a pro různé scénáře dotyku suchý – Dry, mokrý – Wet, mokrý mořská voda – Salt, podle [4]130
Obr.	6-4 Velikost odporu lidského těla pro střední 1000 mm <sup>2</sup> (a) a malou 100 mm <sup>2</sup> (b) dotykovou plochu v závislosti na dotykovém napětí vyskytující se v populaci s 5, 50 a 95 % zastoupením a pro různé scénáře dotyku suchý – Dry, mokrý – Wet, mokrý mořská voda – Salt, podle [4]
Obr.	6-5 Průběh rozložení velikosti odporu lidského těla v populaci pro velkou a suchou plochu dotyku – distribuční funkce
Obr.	6-6 Průběh rozložení velikosti odporu lidského těla v populaci pro velkou mokrou plochu dotyku se solí – distribuční funkce

<i>Obr. 6-7 Příklad elektrického schématu obvodu při dotykovém napětí, upraveno z EN 50522 [2],</i> $U_{vTp}$ předpokládané dotykové napětí, $R_T$ odpor lidského těla a $R_{F1}$ a $R_{F2}$ přídavné odpory 134
Obr. 6-8 Průběh odporu lidského těla pro 50 % populace pro velkou a suchou plochu dotyku, s naznačením iterační metody pro nalezení odporu lidského těla splňující napěťový Kirchhoffův zákon při přídavných impedancích, V <sub>it</sub> je počáteční odhad dotykového napětí a V <sub>t</sub> je část dotykového napětí na osobě
Obr. 6-9 Křivka odporu lidského těla Z <sub>body</sub> při zahrnutí napěťové i populační závislosti v obvodu s přídavnou izolací [115]135
Obr. 6-10 Proudově časové c-křivky pro pravděpodobnost fibrilace podle IEC TS 60479-1:2005 (a), (b) naznačení způsobu získaní plochy rozložení pravděpodobnosti fibrilace – naznačena distribuční funkce pro velikost proudu tělem při konstantním čase 200 ms, rozložení podle [11]
Obr. 6-11 Plocha rozložení pravděpodobnosti fibrilace v závislosti na protékaném proudu a době jeho působení, naznačení tvorby podle dat z IEC TS 60479-1139
Obr. 6-12 Pravděpodobnost fibrilace křivek dovolených dotykových napětí pro dráhu proudu levá ruka obě nohy
Obr. 6-13 Pravděpodobnost fibrilace křivek dovolených dotykových napětí pro dráhu proudu pravá ruka pravá noha144
Obr. 6-14 Pravděpodobnost fibrilace křivek dovolených dotykových napětí pro různé dotykové scénáře podle sestrojených skriptů Erisk ve srovnání s Argonium, dráha proudu LHBF a křivky c3-c4, (a) scénář 1, (b) scénář 3, (c) scénář 4, (d) scénář 5
Obr. 6-15 Pravděpodobnost fibrilace křivek dovolených dotykových napětí pro různé dotykové scénáře podle sestrojených skriptů Erisk a ve srovnání s Argonium, dráha proudu RHRF a křivky c3-c4, (a) scénář 1, (b) scénář 3, (c) scénář 4, (d) scénář 5146
Obr. 6-16 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c3-c4 bez přídavných izolací150
Obr. 6-17 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c3-c4 s Rshoe 1000 Ω a ρ 5 Ωm154
Obr. 6-18 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovolených dotykových napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c3-c4 s Rshoe 1000 Ω a ρ 5000 Ωm155
<i>Obr.</i> 6-19 Porovnání hodnot pravděpodobností koincidence podle britského standardu BS EN 50522 a australské příručky EG-0 při proměnné délce trvání poruchy fd, a pro počet poruch fn = 1 za rok, počet dotyků pn 1000 za rok a průměrnou délku trvání dotyku pd 1s 
Obr. 6-20 Společné uzemnění strany vysokého i nízkého napětí DTS, naznačeny toky proudů při různých poruchách [105]160
Obr. 6-21 Schéma zemniče kioskové distribuční trafostanice v případové studii161
Obr. 6-22 Schéma zjednodušené distribuční sítě s vyhodnocovanou DTS [105]162

Obr.	6-23	Oddělené	uzemnění	strany	vysokého	а	nízkého	napětí	distribučního
t	ransfor	mátoru [105	]		••••••		•••••	•••••	163
Obr. k	6-24 kompen	Výsledky citi zovaná síť	livostní ana	lýzy, pro	ocentuálně	měn	ěné vstup	ní paran	netry výpočtu, 170
Obr.	6-25 Vý	sledky citlivo	ostní analýzy	, absoluti	ně měněné p	parar	netry, kom	penzovan	á síť174

### **SEZNAM TABULEK**

Tab.	2-1 Vyhodnocení míry rizika-přepracováno z [30]29
Tab.	2-2 Vyhodnocení míry rizika – převzato z [35]31
Tab.	4-1 Souhrn aplikovaných pravděpodobnostních přístupů
Tab.	5-1 Zemní odpor základních zemnících elektrod, Rüdenberg [52]45
Tab.	5-2 Vztahy pro zemní odpory různých typů elektrod, Dwight [50]47
Tab.	5-3 Přehled vzorců pro výpočet zemních odporů, Osolsobě [65]48
Tab.	5-4 Vztahy pro výpočet uzemnění, EN50522 [2]49
Tab.	5-5 Koeficienty využití podle starého a nového znění podnikové normy energetiky51
Tab.	5-6 Rozsah rezistivit, IEEE 80 [6]
Tab.	5-7 Vliv nepřesnosti určení parametrů dvouvrstvého modelu půdy, kruh s tyčí uprostřed75
Tab.	5-8 Porovnání výsledku dvouvrstvého a homogenního modelu půdy HoL, měření Hrušovany nad Jevišovkou
Tab.	5-9 Porovnání výsledků dvouvrstvého a homogenního modelu půdy LoH
Tab.	5-10 Skutečný model HoL 1000/500/5, nahrazen dvouvrstvým modelem 1012/117/1.2 s kruhem D = 18 m
Tab.	5-11 Skutečný model HoL 1000/500/5, nahrazen jednovrstvým homogenním 530 $\Omega$ m, kruh $D = 10 m$
Tab.	5-12 Skutečný model LoH 500/1000/5, nahrazen dvouvrstvým 500/180/5 s kruhem D = 12 m 
Tab.	5-13 Skutečný model LoH 500/1000/5, nahrazen jednovrstvým homogenním 276 $\Omega$ m s kruhem $D = 6$ m
Tab.	5-14 Skutečný model HoL 1000/500/5, nahrazen dvouvrstvým 1012/117/1.2 s dvěma kruhy D = 6 a 14 m
Tab.	5-15 Vypočtené parametry mřížových zemničů pokročilejšími metodami109
Tab.	6-1 Individuální míra rizika úmrtí osoby při výkonu daných činností, 1996, [107]123
Tab.	6-2 Individuální míra rizika úmrtí osoby v důsledku různých příčin, 2001 UK, [110]123
Tab.	6-3 Individuální míra rizika úmrtí zaměstnance v různých průmyslových odvětvích, 2001 UK, [110]
Tab.	6-4 Individuální míra rizika úmrtí různých věkových skupin, 2001 UK, [110]124
Tab.	6-5 Parametry plochy rozložení pravděpodobnosti fibrilace pro různou kombinaci c-křivek
Tab.	6-6 Velikost koeficientu F pro přepočet proudu pro jinou dráhu tělem než levá ruka obě nohy, podle [4]139
Tab.	6-7 Velikost vypočtených poruchových proudů a koincidenčních koeficientů pro ziednodušenou distribuční síť

Tab. 6-8 Použitá statistika poruch v distribuční síti	165
Tab. 6-9 Navržené dotykové scénáře pro stanovení individuálního rizika	166
Tab. 6-10 Dílčí výsledky výpočtu individuálního rizika pro kompenzovanou síť	167
Tab. 6-11 Velikosti dílčích a souhrnných individuálních rizik Prisk pro jednotlivé typy sí	tě168

### SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

- ALARA As low as reasonably achievable způsob vyhodnocení rizika v souladu s posouzením vynaložených nákladů na jeho eliminaci
- ALARP As low as reasonably practicable (~ ALARA)
- CBA Cost benefit analysis analýza nákladů a přínosů
- cl Křivka minimální pravděpodobností fibrilace (~ 0.1 %) [4]
- c2 Křivka s pravděpodobností fibrilace 5 % [4]
- c3 Křivka s pravděpodobností fibrilace 50 % [4]
- c4 Křivka s pravděpodobností fibrilace 95 % [4]
- DTS Distribuční trafostanice VN/NN (např. stožárová 22/0.4 kV atp.)
- **EPR** Nárůst potenciálu zemniče (V) podle EN 50522 [2], napětí zemniče proti vzdálenému bodu v nekonečnu
- FEM Finite element method, metoda konečných prvků
- Koincidence Pravděpodobnost vzniku rizikové události, tj. pravděpodobnost výskytu poruchy a současného dotyku
- MC Metoda výpočtu Monte Carlo

NN - Nízké napětí (< 1 kV)

- S-křivky Křivky konstantní pravděpodobnosti fibrilace podle IEC/TS 60479 [4]
- SV step voltage, krokové napětí [V]
- TV touch voltage, dotykové napětí [V]
- VN Vysoké napětí (1 kV < U < 52 kV)
- VVN Velmi vysoké napětí (52 kV < U < 300 kV)
- Základní parametry zemniče Zemní odpor, dotykové napětí atd., viz popis na začátku kapitoly 5
- **ZVN** Zvláště vysoké napětí (> 300 kV)
- 1f Typ poruchy jednofázová (zemní)
- 2f Typ poruchy dvoufázová
- 2fE Typ poruchy dvoufázová zemní
- 3f Typ poruchy třífázová
- 3fE Typ poruchy třífázová zemní
- *a* Rozestup elektrod při Wennerově měření rezistivity půdy [m]
- *a* Rozměr, poloměr elektrody [m]

Α	Konstanta [-]			
ARC	Koeficient vyjadřující procento poruch, které nebyly odstraněny automatikou opětovného zapnutí [-]			
b	Hloubka zatlučení elektrod při Wennerově měření rezistivity půdy [m]			
b	Rozměr [m]			
В	Magnetická indukce [T]			
В	Poloměr koule, rozměr elektrody zemniče [m]			
С	Napěťový koeficient podle IEC 60909 [119] [-]			
С	Elektrická kapacita [F]			
CRF	Koeficient upravující pravděpodobnost koincidence [-]			
dl	Délka segmentu [m]			
du	Délka elementu [m]			
D	Průměr, rozměr zemnících elektrod [m]			
е	Rozměr, hloubka pod povrchem země [m]			
Ε	Intenzita elektrického pole [V/m]			
f	frekvence [Hz]			
$f_{ m d}$	Fault duration – Průměrný čas trvání poruchy pro výpočet pravděpodobnosti koincidence [-]			
$f_{n}$	Fault number – Průměrný počet poruch za rok pro výpočet pravděpodobnosti koincidence [-]			
F	Koeficient pro přepočet účinků proudu pro různou dráhu proudu tělem [-]			
$F_{n}$	Koeficient, podle (6-35) [-]			
h	Hloubka povrchové vrstvy půdy [m]			
h	Hloubka uložení zemnící elektrody [m]			
Н	Hloubka povrchové vrstvy půdy [m]			
Н	Intenzita magnetického pole [A/m]			
i	Proud elementem/bodovým zdrojem [A]			
<i>i</i> j	Lineární proudová hustota [A/m]			
Ι	Proud [A]			
$I_{\rm B}$	Proud tělem při dotykovém napětí [A]			
$I_{\rm E}$	Poruchový proud zemničem [A]			
$I_{ m HB}$	Proud lidským tělem [A]			
J	Proudová hustota [A/m <sup>2</sup> ]			
Κ	Koeficient odrazu (5-45) [-]			
Kn	Koeficient, podle (6-36) [s]			

Délka venkovního vedení [km] l 1 Rozměr, délka [m] L Délka, rozměr zemnících elektrod [m] Obecně počet, např. počet elementů atp. [-] п Ν Počet [-] Presence duration – Průměrná délka dotyku dotykového scénáře pro výpočet  $p_{\rm d}$ pravděpodobnosti koincidence [-] Presence number – Průměrný počet dotyků za rok pro dotykový scénář pro výpočet  $p_n$ pravděpodobnosti koincidence [-] Р Činný výkon [W] Pappiled Pravděpodobnost výskytu dané úrovně nebezpečí [-] Pravděpodobnost koincidence - tj. pravděpodobnost výskytu poruchy a současného  $P_{\rm coic}$ dotyku [-]  $P_{\rm E}$ Pravděpodobnost dotyku neživých částí elektrického zařízení za rok (~výskytu osoby) [-]  $P_{\mathrm{fib}}$ Pravděpodobnost fibrilace [-]  $P_{\rm F}$ Pravděpodobnost vzniku poruchy za rok [-]  $P_{\rm FB}$ Pravděpodobnost fibrilace [-]  $P_{\rm IR}$ Hodnota individuálního rizika (pravděpodobnost úmrtí jednotlivce [-]  $\Delta P_k$ Činné ztráty transformátoru na krátko [W] Pravděpodobnost výskytu dané velikosti odporu lidského těla v populaci [-]  $P_{\rm pop}$ Pravděpodobnost úmrtí na následky úrazu elektrickým proudem za rok (velikost PRisk individuálního rizika) [-] Pwithstand Pravděpodobnost úrovně odolnosti [-] Elektrický náboj [C] q Q Jalový výkon [var] Polohový vektor, velikost [m] r Vnitřní poloměr zemnících elektrod (pásků, tyčí) [m] r Vzdálenost, délkový rozměr [m] r Redukční faktor [-] r  $R_{0k}$ Netočivá podélná rezistance vedení na km délky  $[\Omega/km]$ Sousledná podélná rezistance vedení na km délky [ $\Omega$ /km]  $R_{1k}$ S Zdánlivý výkon [VA] t Čas [s] Čas nastavení ochran [s] t<sub>clear</sub> Т Čas [rok]

- *u,v,w* Proměnné označující vzdálenost v kartézském souřadném systému uvw [m]
- *u*<sub>k</sub> Poměrná hodnota napětí na krátko transformátoru [-]
- U Elektrické napětí, (elektrický potenciál) [V]
- *U*<sub>E</sub> Napětí na zemniči při poruše (~ celkový nárůst potenciálu zemniče EPR) [V]
- U<sub>EPR</sub> Nárůst potenciálu zemniče, potenciál na povrchu zemnící elektrody [V]
- $U_{\rm T}$  Skutečné dotykové napětí (nezatížené  $U_{\rm Tp}$  ponížené o úbytek na přídavných impedancích obuv aj.) [V]
- *U*<sub>Tp</sub> Předpokládané dotykové napětí [V]
- *U*<sub>x</sub> Elektrický potenciál ve vzdálenosti x [V]
- V Elektrický potenciál, (elektrické napětí) [V]
- *x* Rozměr, vzdálenost [m]
- *x*,*y*,*z* Proměnné označující vzdálenosti v kartézském souřadném systému xyz [m]
- $X_{0k}$  Netočivá podélná reaktance vedení na km délky [ $\Omega$ /km]
- $X_{1k}$  Sousledná podélná reaktance vedení na km délky [ $\Omega$ /km]
- y Rozměr, vzdálenost [m]
- *Y* Admitance [S]
- $Z_{\rm E}$  Impedance uzemnění [ $\Omega$ ]
- *α* Označení úhlu [°]
- $\beta$  Označení úhlu [°]
- $\delta$  Lineární proudová hustota [A/m]
- $\eta$  Koeficient využití zemniče [-]
- $\lambda$  Normalizovaná proudová hustota [A/m/V]
- $\mu$  Střední hodnota pravděpodobnostního rozdělení [-]
- $\pi$  Matematická konstanta, Ludolfovo číslo 3,14159... [-]
- $\rho$  Elektrická rezistivita, rezistivita půdy [ $\Omega$ m]
- $\rho_1$  Rezistivita povrchové vrstvy půdy [ $\Omega$ m]
- $\rho_2$  Rezistivita podloží (spodní vrstvy půdy) [ $\Omega$ m]
- $\sigma$  Rozptyl pravděpodobnostního rozdělení [-]
- $\varphi$  Elektrický potenciál [V]
- $\phi$  Označení proměnné [-]
- $\psi$  Označení funkce [-]
- ∇ Nabla operátor [-]

# 1 Úvod

Prakticky každá činnost lidského života je spojena s určitou mírou rizika, že při jejím výkonu může dojít k úmrtí daného vykonávajícího jedince. Lidé se obvykle k podstoupení daného rizika rozhodují na základě porovnání se získanými benefity. V případě pak, že podstupované riziko je již příliš velké vzhledem k získaným benefitům, tak lidé přistupují k opatřením, jak podstupované riziko zmenšit. Tak například při využívání automobilové dopravy lidé podstupují dobrovolně riziko, že cca 1 z 17000 přepravovaných osob za rok zemře při dopravní nehodě [110]. I když se toto jeví jako relativně malé číslo, tak nezanedbatelnou zásluhu na něm má právě využívání bezpečnostních pásů. Podle statistik dopravních nehod v USA [123], [124] lze předpokládat, že v důsledku jejich používání tyto snížily počet úmrtí při dopravních nehodách o přibližně 27 % a v případě, že by byly důsledně využívány všemi zesnulými osobami při dopravních nehodách, tak by celkový počet mrtvých byl dále snížen o cca 9 %. Zavedení bezpečnostních pásů je typickým příkladem způsobu eliminace podstupovaného rizika, kdy instalováním relativně levného zařízení je možné docílit značného snížení podstupovaného rizika. Přestože by bylo možné vynaložit mnohem více prostředků na eliminaci rizika úmrtí při dopravní nehodě, tak toto obvykle není příliš výhodné a je spíše hledáno určité optimum mezi přijatelnou mírou rizika a vynaloženými prostředky na jeho eliminaci. Paralelou k uvedenému rozboru rizik spojených s využíváním automobilové dopravy je pak také například rozbor rizik spojených s využíváním elektrické energie.

K nejhoršímu riziku spojenému s využíváním elektrické energie dozajista patří úmrtí v důsledku úrazu elektrickým proudem. Způsobů, jak může dojít k úrazu elektrickým proudem, existuje relativně velké množství, přičemž u všech těchto způsobů jsou zavedena opatření eliminující pravděpodobnost, aby buď už k úrazu vůbec nedošlo, nebo aby případný úraz neměl fatální následky. Z hlediska provozování silového elektroenergetického rozvodného systému je jedním ze způsobů, jak může dojít k úrazu elektrickým proudem výskyt zvýšeného elektrického potenciálu na neživých částech elektrických zařízení při poruše. Výskyt nebezpečně vysokých potenciálů se v tomto případě nejčastěji eliminuje skrze důsledné zemnění celého rozvodného systému a potažmo tak propojených neživých částí zařízení. Aby bylo dosaženo požadované/akceptovatelné míry rizika je nezbytné navrhnout tvar a rozměry zemnící soustavy takové, aby prostředky byly vynaloženy pokud možno co nejefektivněji a úměrně eliminovanému nebezpečí, obdobně jako např. v případě zmíněných bezpečnostních pásů. Aby bylo možné vhodný tvar a rozměry zemnící soustavy navrhnout je nezbytné nejprve vznikající riziko kvantifikovat/vyčíslit a následně je možné jednotlivé varianty návrhu zemniče mezi sebou porovnávat.

Je nezbytné říci, že v současnosti skutečné riziko při návrhu zemnících soustav není vhodně kvantifikováno a je spíše využíván deterministický přístup nejhoršího scénáře. Nicméně i přes tento silně negativní nejhorší scénář se ukazuje, že v důsledku značné stochasticity všech jevů a parametrů, které mají vliv na výslednou hodnotu rizika, volba tohoto nejhoršího scénáře nemusí vždy vést ke konzervativnějším výsledkům a výsledný návrh tak může být poddimenzován. Obdobně se pak taky ukazuje, že v některých případech nejhorší scénář není až tak pravděpodobný a tak nastávají i situace, kdy současný postup návrhu zemnící soustavy je předimenzovaný, neboli prostředky na eliminování rizika jsou vynakládány nevhodně. Na mezinárodní úrovni lze dnes spatřovat vliv přesunu od návrhů založených na nejhorším scénáři k přístupům kvantifikujícím vhodným způsobem skutečnou míru rizika. V případě těchto přístupů se tak především jedná o vhodné pravděpodobnostní modelování všech stochastických jevů definujících dané skutečné

riziko. Tématu pravděpodobnostního přístupu pro hodnocení zemnících soustav se pak věnuje i tato práce, která se zaměřuje na užití pravděpodobnostního přístupu na zemniče v distribučních sítích. Užití tohoto přístupu s přesnějším kvantifikováním skutečného rizika lze předpokládat právě pro nalezení vhodnějšího tvaru a rozměrů zemnící soustavy s ohledem na vynaložené prostředky. Další možnou oblastí užití tohoto přístupu mohou být bezesporu situace vhodnějšího posouzení změny parametrů zemničů v průběhu času, kdy např. při zvyšování parametrů sítě (zkratového proudu) je lépe kvantifikovatelný jejich vliv na výsledné riziko zemnící soustavy.

# 2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Na úvod je zapotřebí zmínit, že tato disertační práce se bude zabývat primárně hodnocením zemnících soustav s napětími vyššími jak 1kV a.c. Pravděpodobnostní přístup pro hodnocení zemnících soustav v soustavě nízkého napětí (NN) by byl teoreticky také možný, nicméně z dalšího bude vyloučen. Následující text se tak bude zabývat zemnícími soustavami např.: v rozvodnách, zemnění stožárů přenosových a distribučních vedení, stožárových transformačních stanic, odpínačů atp. Jde tedy o zařízení spravovaná a udržovaná školeným personálem, která ovšem mohou negativně působit i na veřejnost pohybující se v jejich blízkosti. Dále je nezbytné zmínit, že NN zemniče nelze z rozboru úplně vyřadit, neboť zemnící systémy vysokého a nízkého napětí bývají často spojovány, či provozovány ve vzájemné těsné blízkosti a tak původce rizika v sítích vysokého napětí působí riziko i v soustavách NN.

K základním současně platným dokumentům v oblasti návrhu a hodnocení zemnících soustav pro zařízení se jmenovitým napětím vyšším jak 1 kV lze v současné době přiřadit normy EN 61936-1 [1] (definující obecné požadavky) a dále pak hlavní dokument EN 50522 [2]. Z hlediska specifika českého prostřední pak lze tyto základní dokumenty doplnit ještě o podnikovou normu elektroenergetiky PNE 33 0000-1(5) [3], která shrnuje stěžejní požadavky z uvedených norem a je doplněna o některá další doporučení. Tato doporučení jsou obvykle národního rázu a nevycházejí z mezinárodních publikací.

Pod pojmem uzemňovací soustava si lze představit soubor prvků a spojů, které jsou v kontaktu s půdou obvykle pod nebo v okolí daného zařízení. Toto propojení tak vytváří vodivé spojení vodivých neživých částí zařízení se zemí. Uzemnění se ve většině případů provádí za účelem zvýšení bezpečnosti provozu (ochrana před nebezpečnými dotykovými napětími, ochrana před přepětím způsobeným úderem blesku). Způsob uzemněním uzlu zdroje pak také umožňuje docílit zvýšené spolehlivosti provozu sítě i v případě poruchy. Podle EN 50522 pak musí být zemnící soustava schopna odolat očekávaným elektrickým, mechanickým a klimatickým vlivům okolního prostřední. K elektrickým požadavkům na uzemňovací soustavu lze přiřadit způsob uzemnění uzlu zdroje a odolnost na tepelné a mechanické účinky zkratových/poruchových proudů. Z hlediska klimatických změn je pak požadováno, aby si uzemňovací soustava udržovala po celou dobu své životnosti pokud možno neměnné provozní parametry a dále, aby vlivem proměnlivého počastí nedocházelo k příliš rychlému zhoršování provozních parametrů. Mimo výše uvedených požadavků jsou na zemnící soustavy také kladeny bezpečnostní kritéria, ke kterým patří udržení dotykových a krokových napětí v určitých mezích, aby nedošlo při poruše k ohrožení zdraví osob.

Základní postup pro návrh zemnících soustav v souladu s bezpečnostními kritérii je uveden v normě EN 50522. Základním předpokladem tohoto postupu je fakt, že lidské tělo představuje z elektrického hlediska určitou impedanci (odpor) a při přiložení potenciálu lidským tělem začne procházet elektrický proud. Účinky elektrického proudu na člověka byly zkoumány již od samotného rozvoje elektroenergetiky a stěžejní poznatky jsou shrnuty v normě IEC/TS 60479-1 [4]. Za nejnepříznivější jev při průchodu proudu lidským tělem je uvažována fibrilace srdečních komor, která bez rychlé lékařské pomoci vede k úmrtí postižené osoby. Elektrický proud kromě fibrilace komor může způsobovat také řadu dalších negativních jevů, ke kterým lze přiřadit např.: nedobrovolné svalové kontrakce (může vést k poškození svalů, šlach atp.); při nedobrovolných svalových kontrakcí v oblasti hrudního koše pak může dojít k zástavě dechu, průchod proudu lidským tělem způsobuje popáleniny jak kůže, tak i vnitřních orgánů

a v neposlední řadě způsobuje narušení homeostázy lidského těla, která může vést u postižených k následnému selhání ledvin a dalších vnitřních orgánů.

Při návrhu zemnících soustav je za nejnepříznivější jev považována fibrilace komor. V současné době lze spatřovat dva podobné přístupy udávající limitní hodnoty proudů lidským tělem, které jsou uvedeny ve standardech:

- IEC/TS 60479-1, data jsou založena na studii Biegelmeiera a Leeho [5] a korespondují se zjištěním, že pokud dojde k zasažení srdce proudem v období komorové relaxace (zranitelná T fáze cyklu) je pravděpodobnost fibrilace mnohem vyšší (stačí proud cca nad 50mA), kdežto pokud dojde k zasažení srdce proudem ve zbylé části cyklu je pravděpodobnost vzniku komorové fibrilace nižší (proud nad cca 500 mA). Zranitelná fáze tvoří cca 1/5 celého cyklu. Pokud proud působí déle, jak jeden celý cyklus pravděpodobnost vzniku fibrilace se zvyšuje. Na základě těchto zjištění byly sestrojeny tzv. "S-křivky" c1-c4.
- IEEE 80 [6] standard platný např. v USA, Kanadě, Austrálii atp. Limitní hodnoty jsou zde založeny na předpokladu, že vznik fibrilace je závislý na hmotnosti postižené osoby a tak v tomto standardu jsou uvedeny dvě křivky vycházející z práce Dalziela [7] pro osoby vážící 50kg a 70kg (I50 a I70).

Podkladem pro vytvoření limitních křivek proudů byly experimentální práce Ferrise [8] a dalších [9] prováděné na zvířatech. Tyto limitní křivky se staly námětem porovnávání v mnohých pracích - zde např. zdroj [10]. Oboje křivky jsou vyneseny v obrázku Obr. 2-1.



*Obr. 2-1 Limitní křivky proudu podle [4] c1-c4 a podle [6] I50 a I70, křivky c1-c4 značí limitní hodnoty fibrilace s 0.5, 5, 50 a 95 % pravděpodobnostní, obrázek převzat z [11]* 

Diagram postupu při návrhu zemnící soustavy podle EN 50522 je pak vyobrazen na následujícím Obr. 2-2.



Obr. 2-2 Diagram návrhu uzemňovacích soustav [2]

Při současném návrhu je tedy doporučen postup:

- Pro dané místo stanovit předpokládaný poruchový proud *I*<sub>E</sub> (v praxi nejčastěji pomocí metody souměrných složek, norma 50522 také říká jaký proud má být brán v potaz pro různé typy uzemnění uzlu zdroje uvažují se jednofázové poruchy). V závislosti na propojení dané uzemňovací soustavy s dalšími soustavami (např. pomocí stínění kabelových plášťů) se může použít redukčních součinitelů.
- Pro daný návrh uzemňovací soustavy stanovit analyticky, nebo měřením velikost jejího zemního odporu/impedance Z<sub>E</sub>; při prvním návrhu je možné vycházet ze zkušeností nebo první návrh navrhnout zcela libovolně.
- Následně určit celkový nárůst potenciálu zemniče  $U_{\rm E}$ .
- Pro zjednodušení byly hodnoty dovolených proudů přepočteny na hodnoty dovolených dotykových napětí  $U_{\text{Tp}}$  (křivka je uvedena v 50522, pro křivku byly uvažovány vstupy: křivka c2 z obrázku Obr. 2-1 uvažující pravděpodobnost fibrilace 5 %, proudová dráha ruka noha, impedance těla pro 50 % populace a scénář bez přídavné rezistance). Hodnota nárůstu potenciálu  $U_{\text{E}}$  navrhovaného zemniče se pak porovnává podle diagramu s násobky dovoleného dotykového napětí. Pokud nebude splněna ani podmínka  $U_{\text{E}} < 4U_{\text{Tp}}$  norma dále navrhuje přistoupit k určení skutečných dotykových napětí  $U_{\text{T}}$  a proudů tělem  $I_{\text{B}}$  a ty porovnat s křivkou dovolených dotykových napětí.
- Pokud návrh nevyhoví ani pro skutečné hodnoty dotykových napětí, je zapotřebí provést nápravná opatření (přivést části zároveň přístupné dotyku na stejný potenciál atp.) nebo přepracovat návrh, tzn. obvykle snížit celkovou Z<sub>E</sub>.

Výše uvedený postup je víceméně založen na deterministickém přístupu s uvažováním pokud možno nejhoršího možné scénáře v průběhu celého návrhu. Tedy např.:

- Při výpočtu poruchového proudu se uvažuje porucha přímo v místě uzemňovací soustavy, konfigurace nadřazené soustavy je uvažovaná tak, aby příspěvek k poruchovému proudu byl co největší, zanedbávají se příčné prvky poruchového obvodu.
- Doba dotyku při posuzování dotykových napětí je uvažována jako nejdelší možný čas vypnutí poruchy příslušnou ochranou.
- Impedance lidského těla je uvažovaná rovna pro 50 % populace.
- Je vždy uvažován dotyk osoby, i když tomu tak často být nemusí.

Většina vstupních parametrů je uvažovaná jako jedno konkrétní číslo. Z hlediska teorie pravděpodobnosti jde buď rovnou o střední hodnotu, nebo hodnotu z oblasti 2 až 3-násobku rozptylu (tedy z oblasti, ve které se pohybuje 95-99,7% všech hodnot a to tak, aby bylo dosaženo nejhoršího možného scénáře).

Samotná norma 50522 [2] v kapitole 4.3 uvádí "*Musí se také zahrnout, že výskyt poruchy, amplituda poruchového proudu, doba trvání poruchy a přítomnost osoby jsou pravděpodobnostní povahy"*. Nicméně sama norma krom této strohé informace neudává žádný bližší návod, jak tuto pravděpodobnostní povahu zahrnout do výpočtů.

Jako první se pravděpodobnostním (stochastickým) přístupem při návrhu zemnících soustav začali zabývat výzkumníci ve Finsku [12]. K jedněm z prvních autorů, kteří se snažili navrhnout komplexnější metodiku pro pravděpodobnostní přístup lze přiřadit **El-Kadyho**. Z roku 1983 od něj pochází celá série článků, ve kterých popisuje komplexní metodiku pravděpodobnostního přístupu spolu s vytvořeným počítačovým programem. El-Kady se začal nejprve věnovat tvorbě programu pro výpočet zkratových/poruchových proudů [13]. V uvedeném časopisném příspěvku se věnoval především matematickému popisu výpočetního programu založeném na metodě admitanční matice spolu s využitím metody Monte Carlo. Autor pak v následujícím příspěvku uveřejněném současně s předchozím ve stejném časopise s názvem Probabilistic Short-Circuit Analysis by Monte Carlo Simulation [14] prezentoval samotné možnosti daného programu. Program byl schopný vytvořit histogram (rozložení) velikostí zkratových proudů tekoucích přes libovolnou přípojnici (zkratové poruchy se vyskytovaly různě v síti, ne jen na přípojnici, jak je znám klasický deterministický přístup, kterým lze získat nejhorší možný scénář), nebo histogram velikosti zkratových proudů pro dané vedení pro poruchy vyskytující se náhodně na tomto vedení. V rámci tohoto programu bylo možné zadávat různé parametry získané z praxe na základě jejich statistiky, popřípadě některé parametry modelovat jako náhodné veličiny s odpovídajícím pravděpodobnostním rozložením (tedy pomocí střední hodnoty a rozptylu). Jednalo se tedy např. o:

- Poruchy se vyskytují častěji na dlouhých vedeních.
- Program v rámci Monte Carlo simulace generoval i náhodný čas a datum.
- Program umožňoval do výpočtu zahrnout roční plán provozu sítě (tj. plánované odstávky a práce na vedení) a tomu i příslušnou topologii sítě, která může mít vliv na velikost zkratových proudů.
- Program z důvodů nedostatku počítačové paměti neuvažoval s různým denním zatížením, které také může mít vliv na výsledné zkratové proudy.
- V programu bylo uvažováno i s pravděpodobnostním rozložením času výskytu poruchy, kdy jako vstupní data byly použity statistické údaje o výskytu poruch z části přenosové sítě Richview Transformer Station v síti Ontario Hydro. Z těchto dat vyplývá, že nejvíce poruch v této síti se vyskytovalo v lednu a šlo o více jak 58 % všech poruch.

 Pro jeden krok metody Monte Carlo se dále vybírá příslušná porucha – 3f, 3fE, 2f, 2fE, 1f opět náhodně, přičemž podle popisu programu bylo při modelování také možné uvažovat se zapouzdřenými rozvodnami, ve kterých se vyskytují téměř jen jednofázové poruchy (mají tedy vyšší pravděpodobnost vzniku).

V uvedeném článku [13] jsou pak také demonstrovány výsledky příkladových studií. Výsledky tohoto programu autor doporučuje využít pro posouzení přístrojového vybavení rozvoden na základě rizika (risk assessment), tj. např. využití pravděpodobnostního přístupu při navrhování stupně odolnosti vedení, přípojnic aj. na tepelné a mechanické účinky zkratových proudů. Jak je z výsledků patrné, nejhorší scénář není příliš pravděpodobný a tak autor upozorňuje na fakt, zda v analýze nákladů a přínosů (CBA cost benefit analysis) neuvažovat s mírným poddimenzováním daných zařízení na úkor snížení nákladů s tím, že do CBA bude zahrnuta položka na případnou opravu zničeného zařízení při výskytu nejhoršího scénáře. Jako další možnou oblast využití autor uvádí také pravděpodobnostní přístup pro hodnocení zemnících soustav. Příklad výsledků popsaného programu je uveden na následujícím obrázku Obr. 2-3. V rámci programu pro výpočet zkratových proudů je pak také věnována zvýšená pozornost zahrnutí vlivu vzájemného ovlivňování paralelních vedení (dvojitých vedení na jednom stožáru atp.) při výpočtu reaktancí.



Obr. 2-3 Statistické rozložení velikostí poruchového proudu na přípojnici P při náhodném místě výskytu zkratu při 500 simulacích [14]

Myšlenkou využití pravděpodobností při návrhu zemnících soustav stožárů přenosové sítě se pak El-Kady zabýval ve svých dalších dvou článcích. V prvním z těchto článků [15] se El-Kady zabýval úpravou uvedeného programu na program pro výpočet pravděpodobnostního rozdělení dotykových napětí u stožárů přenosové soustavy. Jedním z problémů, které vyvstávaly při řešení, je přítomnost zemnících lan u vedení zvlášť vysokého napětí (ZVN). Při 1f a 2fE poruchách na kostru stožáru u těchto vedení dochází k rozdělení zkratového proudu mezi zem a zemnící lano. Výsledný obvod se pak v náhradním obvodovém schématu bude podobat obvodu vyobrazeném na obrázku Obr. 2-4. K řešení takovéhoto typu obvodu autor využil metodu výpočtu prezentovanou v příspěvku [17] (*ladder method*). Dalším problémem je pak, jak stanovit pro dané konkrétní řešení stožáru a vlastnosti půdy dané dotykové napětí, neboť při použití jen velikosti zemního odporu a části poruchového proudu tekoucího přes daný stožár do země lze stanovit pouze celkový nárůst potenciálu zemniče. Pro obejití komplexnosti této problematiky autor do daného programu implementoval koeficienty, vyjadřující jakou procentuální část celkového nárůstu potenciálu zemniče bude tvořit dotykové a krokové napětí. Tyto koeficienty autor stanovil na základě prezentovaných výsledků měření různých typů zemničů v příspěvku [18].





Příklad výsledků z daného programu je vyobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 2-5 Vlevo vyobrazena část dvojitého paralelního vedení s vyznačením umístění sloupů (tečky) (ne všechny jsou zahrnuty do výpočtu, jen určitý počet na každou stranu od postiženého místa), vpravo funkce hustoty pravděpodobnosti velikosti dotykového napětí pro dva typy zemniče u postiženého sloupu, získaná metodou Monte Carlo [15]

Na základě výsledků předchozích článků El-Kady pak metodiku zakončil čtvrtým článkem [16], ve kterém využívá výsledků předchozích tří a doplňuje je popisem metodiky použitelné pro návrh uzemňovacích soustav. Autor se v prezentovaných příkladech nepříliš vhodně zabývá modelováním všech možných vstupních proměnných za pomocí jejich pravděpodobnostního rozdělení, jak sám navrhuje v uvedené metodice. Sám autor uznává, že minimálně modelování odporu lidského těla může mít na výsledky značný vliv a z článku není příliš zřejmé, jak autor vyřešil samotné modelování závislosti odporu lidského těla na přiloženém napětí. Ve všech 3 prezentovaných příkladových studiích autor použil při výpočtu proudu tělem hodnotu odporu lidského těla rovnu 1000 ohmů. V tomto článku je nicméně navržena poměrně zajímavá a pravděpodobně i korektní metodika vhodná pro pravděpodobnostní přístup, obdobná metodice stress-strength. Pro objasnění, tato metodika je založena na stanovení funkce hustoty pravděpodobnosti výskytu určité míry rušení (zatížení atp.) a stanovení funkce hustoty pravděpodobnosti odolnosti proti danému rušení. Následnou konvolucí obou pravděpodobností dojde ke stanovení pravděpodobnosti, že úroveň rušení bude větší, jak úroveň odolnosti. Metodiku by bylo vhodné více rozepsat a popř. doplnit o rozložení pravděpodobnosti odporu lidského těla. Dále by určitě bylo vhodné tuto metodiku zpracovat do programu a porovnat ji s dalšími přístupy (viz popis jiných přístupů dále). Autor se v článku také zabývá problematikou pravděpodobnosti přítomnosti osoby a současného vzniku poruchy. Tyto jevy autor modeluje za pomocí Poissonova pravděpodobnostního rozložení. Autor pro výsledky metodiky ovšem neuvádí, jak tyto výsledky dále použít (co už je např. nepřípustná mez atp.).



Obr. 2-6 Metoda Stress-Strength [16]

Další práci, kterou je nezbytné zmínit je příspěvek čínského autora **Wanga** [20], ve kterém autor do značné míry navázal na práci El-Kadyho. Ve svém příspěvku se zaměřil na doplnění modelování impedance lidského těla s pravděpodobnostním rozložením. Pro tyto účely modeloval impedanci lidského těla jako proměnou s normálním rozložením a stejně tak modeloval i rezistivitu půdy. Práce je založena na použití úrovně odolností stanovených Dalzielem [7] a vztazích použitých v standardu IEEE 80 [6]. V práci není podrobně řešena problematika rozložení dotykových napětí, na což i v přiložené diskuzi naráží recenzent El-Kady, kdy doporučuje použít pravděpodobností přístup pro výpočet zkratových proudů a dále pak recenzent nesouhlasí s aplikovaným zjednodušením při výpočtu dotykových napětí, jelikož závisí na mnoha parametrech (rezistivita, typ stožárů, místo dotyku atp.). Z dnešního hlediska je pak také dobré dodat, že impedance lidského těla sleduje spíše logaritmicko-normální rozdělení, než autorem použité normální rozdělení. Autor také využil sestrojeného programu a v dalším článku [21] provedl citlivostní analýzu při změnách různých parametrů (střední hodnotu a rozptyl odporu člověka, střední hodnotu a rozptyl rezistivity půdy, střední hodnotu a rozptyl dotykových napětí, střední hodnotu doby poruchy a doby dotyku, četnost výskytu poruch a dotyku). Autor uvedenou pravděpodobnostní metodiku také ve svém dalším článku aplikoval na výpočet pravděpodobnosti úmrtí v okolí uzemňovacích elektrod stejnosměrných systémů [22].

O několik let později navázal na oba předešlé autory ve svém příspěvku původem český autor žijící a pracující toho času v USA J.G. **Sverak** [23]. Jeho příspěvek do značné míry kopíruje předešlou metodiku. Autor pro modelování pravděpodobnosti výskytu (dotyku) osoby a současného vzniku poruchy používá Poissonova rozdělení, které ovšem doplňuje třetí pravděpodobností vyjadřující, zda obě náhodné veličiny dotyku a poruchy budou stejné. Tento vztah se nicméně jeví býti chybným na což naráží i recenzent. Autor taktéž prezentovanou metodu doplnil příklady výpočtu s uvedením vstupních dat a výsledků. V příkladových studiích autor udává střední hodnoty a rozptyl pro počet poruch za rok a pro počet dotyků osob. Číselné údaje ovšem nekorespondují s definicí Poissonova rozdělení, kdy tyto dvě veličiny by spolu měly být provázány. Autorem navržené vztahy pro výpočet pravděpodobnosti by bylo vhodné více zanalyzovat a poukázat na případnou správnost postupu. U tohoto příspěvku lze ovšem ocenit autorův návrh na řešení "S-křivky" pravděpodobnosti fibrilace i podle Evropského standartu [4] za použití Markovova diagramu, jelikož všechny předešlé příspěvky se do této doby zabývaly jen jednodušším přístupem podle Dalizela [7]. Využití Markovova diagramu je v příspěvku uvedeno jen jako návrh možnosti řešení bez hlubšího odvození a popisu.

Pravděpodobnostním přístupem při návrhu uzemnění se také zabýval autor J.M. Nahman, známy především skrz výpočet a modelování uzemnění. Ve svém příspěvku [24] se stejně jako předchozí autoři snažil modelovat pokud možno všechny vstupní hodnoty výpočtu jako proměnné s pravděpodobnostním rozložením. Při modelování ovšem místo samotné Monte Carlo metody využil nově její kombinaci s Markovovým procesem. Autor se obdobně jako Sverak ve svém článku snažil vyřešit problematiku souběhu výskytu poruchy a T fáze srdečního cyklu ve které je vyšší pravděpodobnost vzniku fibrilace. Samotná podstata logiky autorem navržené metodiky je v souladu s předešlými. Oproti předešlým se ovšem liší využitím Markovova procesu. O několik let později autor prezentoval další příspěvek [25], který se jako první zabýval aplikací pravděpodobnostního přístupu i pro sítě vysokého napětí (všechny předešlé články popisovaly aplikaci postupu pro přenosová vedení a stanice). V článku autor aplikuje stejnou metodiku jak pro přenosové sítě ovšem s uvažováním odlišného uzemnění uzlu transformátoru. Článku lze ovšem vytknout to, že metodika je aplikovaná na distribuční trafostanici (např. sloupovou, kiosek) ale autor se vůbec nezabývá problematikou společných a oddělených uzemnění. Jak je prezentováno v kapitole 6.6, při společném uzemnění se může značná část nárůstu potenciálu zemniče přenést i do soustavy NN (při provozu této sítě v zapojení TN) a tím se může celkové riziko mnohonásobně navýšit.

Jedním z v současnosti publikujících autorů zabývajících se také problematikou pravděpodobnostního přístupu při uzemnění je Australan William Carman. Ve svém prvním příspěvku [26] se nezabýval do hloubky samotnými výpočty a pravděpodobnostními rozloženími proudu, dotykových napětí atp., ale rozborem míst a osob, které jsou vystaveny zvýšenému riziku při poruše. Hlavní přínos článku pak spočívá v prezentaci nového obecnějšího přístupu k řešení pravděpodobnosti dotyku. Za tímto účelem autoři provedli studii míst, kde a kým může docházet k dotyku a provedli klasifikaci těchto míst do 4 skupin (tříd). Každá skupina je charakterizována pravděpodobností úrovní, že se bude na daném místě vyskytovat osoba a zároveň se dotýkat neživých částí zařízení. Autor předchozí studii doplnil studií [27] statistického rozdělení dalších přídavných impedancí, které mohou zásadním způsobem ovlivnit celkové riziko - používaných bot, povrchových vrstev-asfalt, štěrk, beton. V dalších článcích se autor snažil problematiku popsat z hlediska teorie řízení rizika [28] a poukazovat na vhodnost pravděpodobnostního přístupu prezentováním výsledků z případových studií [29]. V navazujícím článku [30] pak autor poukazuje na možné bezpečnostní rezervy dvou ve světě užívaných bezpečnostních kritérií ([2], [6]). Např. americký standard IEEE 80 uvažuje při výpočtu s jednotnou impedancí lidského těla 1000 ohmů, oproti napěťově závislé hodnotě doporučované standardem IEC 60479 [4], což může vést k rozdílným hodnotám až o 93 %. Stejně tak Biegelmeierovy "S-křivky" byly odvozeny s implementovanou bezpečnostní rezervou okolo 30 % (např. dolní mez proudu 50 mA ve skutečnosti odpovídá proudu 83 mA, která by při dané době trvání vyvolala fibrilaci se stejnou pravděpodobností). V posledním uvedeném příspěvku [30] pak autor poprvé představuje limitní hodnoty Tab. 2-1, které by se daly využít pro hodnocení vypočtených rizik. (ALARP – anglicky "As low as reasonably practicable" – princip vyžaduje provést finanční analýzu provedených úprav a dosaženého zlepšení (CBA), aby bylo možné zhodnotit, zda dané úpravy na snížení rizika finančně příliš nepřekračují vynaložené náklady).

Míra rizika v průběhu životnosti zařízení	Vyhodnocení		
> 10 <sup>-4</sup>	Potřeba snížit riziko		
10 <sup>-6</sup> < Riziko < 10 <sup>-4</sup>	Snížit riziko při zachování principu ALARP		
< 10 <sup>-6</sup>	Obecně přijatelná míra rizika		

Tab. 2-1 Vyhodnocení míry rizika-přepracováno z [30]

Carmanovým článkům [26]-[30] lze naopak vytknout poněkud laxní přístup při popisu dané metodiky a mnohdy použitých vstupních údajů pro příkladové studie. V některých článcích pak není mnohdy přesně zřejmé, jak autor k uváděným výsledným hodnotám rizika přesně dospěl a které všechny vstupní parametry výpočtu modeloval jako proměnné s pravděpodobnostním rozložením (popř. jaký typ), a proto by bylo vhodné autorovy výsledky konfrontovat s nezávisle provedenými studiemi. Autorovy články lze naopak použít jako částečnou inspiraci pro řešení pravděpodobnosti současnosti dotyku a vzniklé poruchy (tzv. koincidence). Autor tak např. v uvedených článcích navrhuje řešení pravděpodobnosti koincidence za pomocí použití Borelových diagramů [31].

Poslední významná skupina autorů věnující se pravděpodobnostnímu přístupu je skupina britských autorů z Cardiff University - Dimopoulos, Griffiths et. al. K jejich práci lze přiřadit několik příspěvků (z nedávných let) zabývajících se souhrnem současného stavu poznání (tj. výše uvedeného El-Kady, W.D. Carman atd.) a případným rozšířením na základě toho, co je definováno v uvedených normách [2], [4]. V jednom příspěvku [32] tak autoři prezentují postup, jak sestrojit 3D graf závislosti pravděpodobnosti fibrilace pro jakoukoliv hodnotu protékajícího proudu a čas působení Obr. 2-7 a Obr. 2-8 (pozn. grafy byly vytvořeny replikací autory navrženého postupu viz 6.3). Ve svém dalším článku [33] pak autoři prezentují případovou studii za použití metodiky prakticky obdobné, kterou navrhoval El-Kady s doplněním o distribuční funkci pravděpodobnosti fibrilace z předchozího článku. Autory provedená studie je poměrně komplexní a v porovnání s El-Kadym je u ní možné pozorovat pokrok v případě dostupných výpočetních nástrojů - výpočetní techniky. Pro studii byly použity programy: CDEGS (program pro výpočet uzemnění, rozložení potenciálu [34], založený na metodě zrcadlení nebo i na řešení elektromagnetického pole v závislosti na použitém výpočetním modulu), RISK Palisade Corporation – program pro statistické zpracování dat a simulaci metody Monte Carlo a programu Power Factory od společnosti DigSilent pro výpočet poruchových proudů a proudů zemnícími lany. Pro prezentování výsledků popř. další potřebné výpočty autoři využili programovacího prostředí MATLAB. Výsledný vývojový diagram použité metody je pak patrný z obrázku Obr. 2-9.



*Obr. 2-7 Distribuční funkce pravděpodobnosti fibrilace v závislosti na proudu tělem a době trvání* 



Obr. 2-8 Funkce hustoty pravděpodobnosti fibrilace v závislosti na proudu tělem a době trvání

V neposlední řadě je pak zapotřebí provedený rozbor doplnit o krátký popis dvou aktuálně platných standardů, které v sobě zahrnují návod, jak postupovat podle pravděpodobnostního přístupu při návrhu uzemnění.

Prvním dokumentem je příloha NB s názvem *Probabilistic risk assessment* britské verze normy **BS EN 50522** [35], která uvádí velice zjednodušený výpočet pravděpodobnosti úrazu jako

$$P_{Risk} = P_F \cdot P_{FB} \cdot P_E \tag{2-1}$$

kde  $P_{\rm F}$  je pravděpodobnost poruchy,  $P_{\rm FB}$  je pravděpodobnost fibrilace (doporučuje se použít hodnoty podle Obr. 2-7, započíst případné další odpory-obuv atp., odpor lidského těla pro 95 % populace) a  $P_{\rm E}$  je pravděpodobnost výskytu osoby. Do uvedeného vztahu se dosazují jen čísla (např.  $P_{\rm F} = 0.2$  za rok, tj. jedna porucha za 5 let,  $P_{\rm E} = 1.9 \cdot 10^{-4}$ , tj. osoba je v kontaktu se zařízením každý den 5 minut po 20 dní v roce =  $5 \cdot 20/365/24/60$ ). Výpočet je dovoleno použít až pokud daná uzemňovací soustava nebude vyhovovat současnému deterministickému přístupu [2] a limitní hodnoty vypočteného rizika jsou založeny na studii rizika působeného jadernými elektrárnami [36] a byly oproti hodnotám navrženým Carmanem zvýšeny na stejné hodnoty jako v Tab. 2-1, ovšem na roční cíl rizika namísto celoživotního, tj.  $10^{-4}/r^{-1}$  a  $10^{-6}/r^{-1}$ , viz Tab. 2-2.



*Obr. 2-9 Navrhovaný postup pravděpodobnostního přístupu podle [33] Tab. 2-2 Vyhodnocení míry rizika – převzato z [35]* 

Míra rizika při provozu zařízení za rok	Vyhodnocení
> 10 <sup>-4</sup>	Potřeba snížit riziko
10 <sup>-6</sup> < Riziko < 10 <sup>-4</sup>	Snížit riziko při zachování principu ALARP
< 10 <sup>-6</sup>	Obecně přijatelná míra rizika

Posledním zde uvedeným zdrojem je australský standard **EG-0** [37], který také dovoluje použít pravděpodobnostního přístupu při návrhu uzemnění. V tomto standardu je odvozen poněkud komplexnější vztah pro výpočet koincidence, nicméně by u něj bylo vhodné ověřit jeho limitaci použití, neboť při určitých, spíše nesmyslných vstupech (kontakt osoby po celý rok, porucha jen 1s v roce), lze uvedeným vztahem získat hodnoty pravděpodobnosti větší jak 1. Tato chyba pravděpodobně pramení ze zjednodušení při odvozování vzorce, kdy byly zanedbány vyšší členy rozvoje exponenciální funkce v řadu. Náhodný jev kontaktu osoby a vzniklé poruchy jsou modelovány pomocí Poissonova rozložení.

### **3** CÍLE DISERTACE

Na základě uvedeného rozboru dané problematiky a jeho současného stavu řešení lze vyvodit následující závěry:

- V prezentovaných článcích lze nalézt prakticky jednotnou logiku přístupu k dané problematice založenou na metodě stress-strength doplněné o pravděpodobnost koincidence (tj. tři části – pravděpodobnostní rozložení vzniklých dotykových napětí, pravděpodobnostní rozložení výdržného napětí (fibrilace) a pravděpodobnost koincidence).
- V literatuře se vyskytuje vícero způsobů, jak vypočíst koincidenci a v této oblasti není jednotný konsenzus, taktéž je otázka, zda rozdílné přístupy dosahují stejných hodnot, nebo jsou případně některé chybné.
- Je publikováno jen několik článků s poměrně detailními statistikami. Pro zlepšení modelovaní, by bylo ovšem vhodné počet těchto statistik rozšířit, aby bylo možné získat korektní pravděpodobnostní rozložení daných vstupních veličin. V současné době provozovatelé distribučních a přenosových sítí ani potřebnými statistikami nedisponují. Proto v mnoha studiích jsou daná statistická rozložení generována uměle na matematických modelech. Získání těchto statistik by také vedlo k verifikaci používaných matematických modelů.
- Jelikož je daná problematika nesmírně komplikovaná, v žádné literatuře se nevyskytuje nějaký jednoduchý jeden, nebo soubor analytických vztahů, na jejichž základě by bylo možné daný výpočet provést "ručně na papíře" a prakticky všechny prezentované výsledky byly získány buď za určitých zjednodušení, nebo (a to mnohem častěji) za pomoci metody Monte Carlo.
- Téměř všechny příspěvky se zabývají aplikováním pravděpodobnostního přístupu pro návrh uzemnění v účinně uzemněných soustavách a to především v oblasti přenosu tj. u nás s napětími 110 kV a více. Byl prezentován jen jeden příspěvek, který se zabýval pravděpodobnostním přístupem při návrhu distribuční transformátorové stanice. Nicméně při výpočtu nebylo uvažováno se společným uzemněním, které může mít podstatný vliv.
- Asi posledním bodem, který již má prezentované řešení, ale může být pro veřejnost diskutabilní, je výsledné hodnocení vypočteného rizika. Tab. 2-2 sice uvádí určité limitní hodnoty, nicméně je zapotřebí si uvědomit, že v případě úmrtí osob z řad veřejnosti (např. v okolí stožáru vysokého napětí) z důvodu úrazu elektrickým proudem, může vzniknout bouřlivá diskuse (o správnosti tohoto přístupu) nad faktem, že již při konstrukci uzemnění bylo připuštěno určité riziko ohrožení osob pohybujících se v bezprostřední blízkosti v okamžiku vzniku poruchy. Přeci jen cenu lidského života lze jen obtížně vyčíslit a případná lidská úmrtí mohou značně očernit celý elektroenergetický průmysl. Jedná se tak spíše o politicko-morální otázku, neboť i dnes jsou uzemňovací soustavy navrhovány s určitou nezanedbatelnou mírou rizika, která je veřejností akceptována jako bezpečná (viz. např. popis křivky dovolených dotykových napětí v [2]). Stejně tak je zapotřebí si uvědomit, že vytváření závěrů, na základě srovnávání známých rizik při různých činnostech není tak jednoduché, jelikož umělým zvolením mezní hodnoty rizika lze u všech osob nedobrovolně zvyšovat celkové nedobrovolné riziko, které za svůj život podstupují. Zvolení mezních hodnot rizika tak může být velice citlivou otázkou, neboť se jedná o zvyšování celkového nedobrovolného rizika.

Z formulace závěrů tak byly stanoveny cíle disertační práce:

- Návrh metodiky pravděpodobnostního přístupu hodnocení zemnících soustav v síti VN a analýza možností využití navržené metodiky k návrhu uzemňovacích systémů v sítích VN, provozovaných se společným uzemňovacím systémem pro VN a NN, kdy se může část rizika přenášet i do sítí NN.
- Ověření správnosti prezentovaných postupů výpočtu koincidence a jejich porovnání.

## 4 Postup a naplnění cílů disertační práce

V této krátké kapitole je provedena diskuze naplnění postulovaných cílů této disertační práce uvedených v předešlé kapitole. Je nezbytné zmínit, že implementace kompletní metodiky, tak jak byla zmíněna v provedené rešerši, je relativně komplexní záležitostí. Pro názornost jsou v Tab. 4-1 velice zjednodušeně shrnuty přístupy všech dosud publikovaných pravděpodobnostních přístupů jednotlivých autorů, tak jak byly naznačeny v kapitole 2. Je nezbytné si uvědomit, že relativně korektní přístup je skrze metodu Monte Carlo, kdy jsou známy rozložení všech parametrů, které mohou mít vliv na dané výsledky. Jelikož metoda Monte Carlo (MC) je pak značně časově náročná, tak nejnovější australský, a i britský přístup - příloha BS EN 50522, od této metody spíše upouštějí a přiklánějí se spíše k přístupu expertního řešení (Stepwise-worstcase) s zavedením jen některých prvků pravděpodobnostního řešení. Z hlediska pravděpodobnostního řešení u těchto přístupů tedy přetrvává řešení

- Pravděpodobnosti výskytu poruchy.
- Pravděpodobnosti výskytu osoby.
- Pravděpodobnosti fibrilace (úmrtí) v závislosti na velikosti působícího proudu a době jeho působení.
- Proud tělem je stanoven z pravděpodobnostního rozložení odporu lidského těla v populaci spolu s jeho napěťovou závislostí.

U těchto přístupů pak jsou další ostatní veličiny mající vliv na pravděpodobnost úmrtí řešeny jen jako čísla a nikoli jako pravděpodobnostní rozložení. K těmto veličinám řešeným jako jedno číslo lze přiřadit

- Přítomnost zemnících lan a tedy různé rozložení toku poruchového proudu redukční faktor.
- Porucha je uvažována s nejhorším příspěvkem v místě dotyku (i poruchy vzdálené mohou přispět k vzniku nebezpečné situace).
- Rezistivita půdy v místě dotyku je uvažována jako konstantní stejná jako u návrhu zemniče
   tedy bez variace.
- Nárůst potenciálu zemniče EPR je stanovený z uvedené hodnoty rezistivity spolu se stanoveným poruchovým proudem.
- Dotyková a kroková napětí jsou stanovená buďto jako poměr z EPR (podle standardu či zkušenosti z měření) nebo pomocí odpovídajícího softwaru pro modelování rozložení elektrického potenciálu zemniče.
- Čas vypnutí poruchy je buďto řešen jako konstantní hodnota odpovídající nastavení ochran (BS EN 50522 [35]) nebo s Poissonovým rozložením.
- Vliv automatiky opětovného zapnutí není zahrnován. Příručka EG-0 [37] doporučuje s tímto vlivem nepočítat.
- Pokud je uvažováno s případnou obuví, tak její hodnota je uvažována také jako konstantní nebo jako s odpovídajícím statistickým rozložením (EG-0 [37]).
- Stejně tak vliv případné instalované povrchové vrstvy (asfalt, kamení aj.), pokud je uvažována, je zahrnut jako konstantní hodnota.

Pro naplnění vytyčených cílů této disertační práce tak bylo rozhodnuto k reprodukování již publikovaných přístupů s zavedením několika drobných obměn s cílem otestovat vliv změny různých parametrů a provedení studií a citlivostních analýz těchto parametrů. Autorem této práce tak byl reprodukován přístup více se podobající metodice podle příručky EG-0. Ač metodika

výpočtu podle této příručky je dostupná prostřednictvím programového nástroje Argon [38], jeho použití není příliš přívětivé, neboť neumožňuje výpočet automatizovat a program dále vykazuje problémy s knihovnami NET.Frameworku. Částečně zjednodušená metodika výpočtu podle tohoto programu byla také zveřejněna prostřednictvím webového prostředí Argonium [39] (*pozn. ovšem až později přibližně v roce 2018 s ohledem k datování této disertační práce*). V Tab. 4-1 tak v posledním sloupci je uveden autorem disertační práce reprodukovaný ,pravděpodobnostní přístup. Z hlediska korektního přisuzování autorství je tento sloupec označen jako VV+DT neboť na tvorbě a implementaci celé metodiky se podílel autor disertační práce spolu s odborným asistentem Davidem Topolánkem působícím na stejném pracovišti, tedy Ústavu elektroenergetiky VUT v Brně.

Autorem reprodukovaný výpočet byl implementován formou série m-file skriptů a funkcí v programu Matlab a to tak, aby mohl být v budoucnu rozšířen na případné použití metody Monte Carlo a otestování různých měnících se vstupních parametrů či jejich odpovídajících rozložení. Jak je uvedeno v tabulce Tab. 4-1, tak se jedná o modifikovaný expertní – stepwise – přístup s zachováním pravděpodobnostního modelování fibrilace a koincidence výskytu nebezpečné události. V porovnání s předchozími přístupy pak lze říci, že oproti starším - EL-Kady, Wang, Sverak - již přístup využívá lépe odpovídajícího logaritmicko-normálního rozložení odporu těla. Oproti britskému přístupu Dimopoulose a BS EN50522 pak využívá sofistikovanějšího přístupu pro výpočet pravděpodobnosti koincidence skrze Poissonovo rozdělení popisující lépe náhodnostní charakter tohoto jevu. A oproti přístupu podle EG-0 (který v podstatě kopíruje) umožňuje otestovat vliv změny některých dalších parametrů a umožňuje výpočet automatizovat pro analýzu v celém spektru řešených stavů (např. pro potřeby citlivostní analýzy). Oproti přístupu podle EG-0 byl dále zkoumán vliv různé dráhy proudu tělem a způsobu modelování odporu lidského těla a přídavné obuvi.

V porovnání s posledním nezmíněným přístupem podle Nahmana se reprodukovaný přístup liší v užití odlišného vyhodnocení, kdy není využito konvoluce pravděpodobností odolnosti a namáhání (nebezpečí/rizika). Pro aplikaci tohoto Stress-Strength přístupu by bylo nezbytné stanovit metodou Monte Carlo rozložení dotykových napětí (tj. uvážení výskytu poruchy v různých místech soustavy, tomu odpovídající různý poruchový proud, sezónní variace rezistivity půdy a dalších faktorů definující pravděpodobnostní rozložení nebezpečí/rizika) tedy pravděpodobnosti úrovně nebezpečí. V současném přístupu bylo toto řešeno pouze jako volbou jednoho konkrétního stavu – jednoho čísla a následně byla provedena citlivostní analýza pro obměny parametrů. Tím jsou zjištěny přibližné meze, v jakých se může výsledné riziko pohybovat, nicméně jsou v podstatě uvažovány v citlivostní analýze všechny se stejnou pravděpodobností. (*Pozn. v případě finského starého standardu nejsou dostupná data o tomto přístupu a v případě Carmana se tento zabýval spíše filozofií celého přístupu nežli metodikou jeho výpočtu)* 

Dále, oproti uvedeným přístupům, byl tento reprodukovaný přístup analyzován pro případ aplikace na zemniče v distribuční soustavě, kdy drtivá většina doposud zveřejněných publikací včetně EG-0 uvažuje s aplikací pravděpodobnostního vyhodnocování zemničů pouze v přenosové soustavě. Je nezbytné si uvědomit, že v případě poruchy v síti se společným zemničem VN a NN může docházet k zanesení nárůstu potenciálu i do sítí nízkého napětí, kde mohou být riziku vystaveny i osoby z laické veřejnosti. Tento stav byl oproti předchozím přístupům nově prezentován v této práci vydefinováním několika dotykových scénářů.

Pozn. Pojmem koincidence se zde myslí pravděpodobnost vzniku rizikové události, tj. pravděpodobnosti výskytu poruchy a současného dotyku. Jelikož vedle koincidence jsou primárním řídícím zdrojem rizika vznikající dotyková napětí byla dále značná část práce věnována také problematice jejich výpočtu a obecně modelování zemničů. Je vhodné zmínit, že v případě zemničů v distribučních sítích, jakými jsou např. trafostanice VN/NN, lze předpokládat i v dnešní době stále využívání mnoha zjednodušujících předpokladů jakými je např. užití zjednodušených analytických vztahů pro stanovení základních parametrů zemnící soustavy, či modelování půdy pouze jeho homogenním ekvivalentem. Přestože dnes již existují dostupné sofistikované softwarové nástroje umožňující přesnější výpočet základních parametrů zemnících soustav, jeví se jejich užití v širší praxi stále příliš nerozšířené. K tomuto dochází nepochybně v důsledku potřeby značných finančních nákladů na pořízení těchto výpočtových nástrojů. Problémem je zde dozajista také poněkud veliké množství takto budovaných/řešených zemnících soustav, což neumožňuje provádět podrobné analýzy ve všech budovaných případech. Je ovšem nicméně faktem, že zvolená zjednodušení májí vliv na přesnost získaných výsledků. Proto se provedený rozbor věnoval právě srovnání různých přístupů modelování zemničů. Výsledky z tohoto rozboru jsou pak diskutovány na modelu použité distribuční sítě a jsou doplněny o diskuzi jejich vlivu na vypočtenou hodnotu rizika.

Dalším motivem provedeného rozboru modelování zemničů je pak fakt, že se nevyskytuje příliš mnoho článků, z kterých byly čerpány meze pro stanovení vzniklých dotykových napětí. V případě starších příspěvků podle El-Kadyho, Wanga, Sveraka či Nahmana tito autoři citovali prakticky pouze tři zdroje pojednávající o velikosti vznikajících dotykových napětí [17], [18], [40], z kterých autoři převzali možné meze (Ratios) dotykových napětí jako procentuální část celkového nárůstu potenciálu zemniče. V případě mladších autorů Carmana, Dimopoulose či EG-0 pak tito citovali uvedené tři reference a dále ještě zohlednili výsledky dvou nových referencí [41], [42] prezentujících další výsledky z experimentálního měření poměrů dotykových napětí. Závěry z těchto článků byly převážně postaveny na provedených měřeních pro některé typy zemničů a některé typy modelů půd. Přestože provedené simulace a jejich výsledky v kapitole 5 této práce víceméně naznačují obdobné poměry (Ratios) dotykových napětí k celkovému nárůstu potenciálu zemniče jako uvedené články, tak rozbor v této práci zachází ještě o něco dál, kdy provádí porovnání, jak se tyto poměry dále změní, pokud by byl zemnič různě přesně modelován. Provedený rozbor v této práci pak rozšiřuje poměry z uvedených 5 publikací o prezentované další jiné zemniče a jiné modely půdy. Vcelku zajímavá je pak reference [41], jejíž výsledky z dlouhodobého měření mohou částečné napovídat o časovém průběhu pravděpodobnostního rozložení velikosti dotykového napětí, neboť je založena na detailnější statistice měření uzemnění vybrané zemnící soustavy, nicméně tyto výsledky nejsou v této práci dále použity.

Práce se tak primárně dělí na dvě části, kdy v kapitole 5 je proveden rozbor metod modelování zemničů se stanovením potenciálních rozdílů vypočteného odporu uzemnění a dotykových napětí a v kapitole 6 je pak provedena diskuze použití pravděpodobnostního přístupu a to i ve světle výsledků právě z kapitoly 5.

Význam zkratek v Tab. 4-1:

- MC výpočet provedený metodou Monte Carlo, výsledkem je rozložení, u Poruchového proudu měněno místo poruchy v síti, obecně voleny vstupní hodnoty podle uvedených rozložení.
- Markov pro modelování pravděpodobnostních jevů zvolena metoda Markovova řetězce.
- Analytický autor odvodil sérii analytických vztahů na základě kterých je možné provést výpočet bez nutnosti provádět výpočet metodou MC.
- Jedna hodnota výpočet proveden pouze pro jednu hodnotu a výsledkem je jedna hodnota.
- Normální rozložení pro modelování parametru použito normální rozdělení, střední hodnota  $\mu$ .
- **Poissonovo rozložení** pro modelování parametru použito Poissonovo rozdělení.
- Empirické rozložení pro modelování parametru použito empiricky stanovené rozdělení.
- LN pro modelování parametru bylo použito logaritmicko-normální rozložení.
- **Nejhorší scénář** zvoleny okolnosti výpočtu vedoucí na nejhorší scénář.
- Stepwise expertní volba různých parametrů a jejich mix vedoucí k nejhoršímu scénáři.
- **Span** Zahrnutí do výpočtu poruch přenesených zemnícím lanem.
- **Reconfiguration** v MC testovány i různé přepojení systému.
- Loading v MC zahrnuty i různé zatížení sítě mající vliv na velikost poruchového proudu.
- Reconnection V Stepwise hledán nejhorší stav přepojení sítě.
- **Reduction** Poruchy mimo postiženou zemnící soustavu stejně jako připojení zemnících lan a stínění zahrnuty skrze redukční faktor.
- Nárůst potenciálu zemniče udává, jak byl stanoven celkový nárůst potenciálu zemniče (Ne – Změna TV přímo – nadřazená síť nebyla modelována a bylo měněno přímo TV, jinak podle popisu ostatních zkratek).
- Dotyková a kroková napětí udává, jak byly určeny dotykové a krokové napětí (Normální rolož. modelováno pomocí normálního rozdělení, Poměry vypočteno poměrem z nárůstu potenciálu zemniče, Jedna hodnota použita jen jedna hodnota, modelování-CDEGS pro výpočet použit software).
- Odpor lidského těla udává jak, byl modelován odpor lidského těla (V závislá 479 pro výpočet použit napěťově závislý průběh odporu lidského těla podle IEC TS 60479-1 [4]).
- **Rezistivita půdy** značí, jak byla modelována půda, převážně použity vícevrstvé modely půdy, v některých případech byly měněny pouze parametry povrchové vrstvy půdy.
- Délka dotyku pro výpočet fibrilace udává, jaký byl zvolen čas pro výpočet fibrilace Jedna hodnota - jeden konkrétní čas, Normální rozlož. u MC simulací.
- Pro koincidenci udává, jak byla počítána pravděpodobnost jevu koincidence.
- **Opětovné zapnutí** udává, zda bylo do výpočtu zahrnuta automatika opětovného zapnutí.
- Zahrnutí obuvi udává, zda a jak bylo při výpočtu počítáno s přídavným odporem obuvi.
- Povrchová vrstva/přechodový odpor udává, jakým způsobem byl zahrnut vliv kontaktního odporu chodidla a půdy (IEEE80 1.5*C*ρ použit vztah pro výpočet TV podle IEEE80 [6], 1.5ρ zahrnut pouze jako násobek rezistivity půdy).
- Pravděpodobnost fibrilace udává, vůči kterým křivkám autor vztahoval výsledné rizika (Dalziel použity křivky pro 50 a 70 kg podle IEEE80 [6], 479 použity S-křivky podle IEC TS 60479-1 [4]).

Vyhodnocení

- **Stress&Strength** při výpočtu stanovena úroveň nebezpečí a odolností, následně pomocí konvoluce stanovena výsledná hodnota rizika.
- **ALARP** Výsledné riziko porovnáno s tolerovatelnými a akceptovatelnými úrovněmi rizika dle ALARP filozofie.
- ALARP+Stress&Strength Riziko stanovené pomocí Stress&Strength porovnáno s úrovněmi ALARP filozofie.

	Autor	Finnish	El-Kady	Wang	Sverak	Nahman	Carman	Dimopoulos	BS EN 50522	EG-0	VV+DT
_	Rok	Std. 1979	1984	1985	1992	1998	2000	2012	2012	2010	2019
	Charak. řešení		МС	Analytický-Jedna hodnota	Analytický-Jedna hodnota	Markov + MC	MC	MC	Nejhorší scénář	Stepwise-Nejhorší scénář	Stepwise-Nejhorší scénář
	Poruchy mimo vyhodnocovaný zemnič		Span + Reconfiguration	Ne	Ne	Stepwise		Reduction + Reconfigurations + Loading	Ne	Span + Reconnection	Ne
I	Poruchový proud		МС	Ne – Změna TV přímo	Jedna hodnota nebo přímo TV	Jedna hodnota – nejhorší scénář	etodiky	МС	Jedna hodnota – nejhorší scénář	Jedna hodnota – Stepwise	Nejhorší scénář – Reduction
٦	Nárůst potenciálu zemniče		Jedna hodnota- z poruchového proudu	Ne – Změna TV přímo	Jedna hodnota nebo přímo TV	Jedna hodnota – nejhorší scénář	oužité me	Jedna hodnota- z poruchového proudu	Jedna hodnota – nejhorší scénář	Jedna hodnota - Stepwise	Jedna hodnota – nejhorší scénář
D	otyková a kroková napětí		Jedna hodnota - Poměr	Normální rozlož.	Normální rozlož.	Jedna hodnota – Nejhorší scénář	dně p	Jedna hodnota - modelování-CDEGS	Jedna hodnota – nejhorší případ	Jedna hodnota - Stepwise	Jedna hodnota - Poměr
0	dpor lidského těla		Jedna hodnota – V závislá 479	Normální rozlož. – $\mu$ 0.5-2 k $\Omega$	Normální rozlož. – $\mu$ 1 k $\Omega$	LN - V závislá 479	ní ohle	Jedna hodnota - V závislá 479	Jedna hodnota - V závislá 479	LN - V-závislá 479	Jedna hodnota - V závislá 479
	Rezistivita půdy	nace	Jedna hodnota	Normální rozlož.	Normální rozlož.	Normální rozlož. povrchové vrstvy	nkréti	Jedna hodnota	Jedna hodnota	Jedna hodnota pro povrchovou vrstvu	Jedna hodnota
	Délka dotyku pro výpočet fibrilace	infor	Normální rozlož.	Normální rozlož.	Normální rozlož.	Normální rozlož.	říliš ko	Normální rozlož.	Jedna hodnota	Jedna hodnota	Jedna hodnota
nci	Počet poruch	'npné	Jedna hodnota	Poissonovo rozlož.	Poissonovo rozlož.	Normální rozlož.	ení p	Jedna hodnota	Jedna hodnota	Poissonovo rozlož.	Poissonovo rozlož.
ncide	Délka poruchy	edost	Jedna hodnota	Poissonovo rozlož.	Poissonovo rozlož.	Normální rozlož.	zde n	Jedna hodnota	Jedna hodnota	Poissonovo rozlož.	Poissonovo rozlož.
o koir	Počet dotyků	Ň	Jedna hodnota	Poissonovo rozlož.	Poissonovo rozlož.	Normální rozlož.	utor	Jedna hodnota	Jedna hodnota	Poissonovo rozlož.	Poissonovo rozlož.
Pro	Délka dotyku		Jedna hodnota	Poissonovo rozlož.	Poissonovo rozlož.	Normální rozlož.	ni, aı	Jedna hodnota	Jedna hodnota	Poissonovo rozlož.	Poissonovo rozlož.
C	)pětovné zapnutí		Ne	Ne	Ne	Ano	hozír	Ne	Ne	Ne	Ano
	Zahrnutí obuvi		Ne	Ne	Ne	Ne	ředc	Jedna hodnota	Jedna hodnota	Empirické rozložení	Jedna hod. 1 k $\Omega$
v	Povrchová rstva/přechodový odpor		IEEE80 1.5 <i>C</i> ρ	Upravená IEEE80 1.5 <i>C</i> ρ	ΙΕΕΕ80 1.5 <i>C</i> ρ	IEEE80 1.5 <i>C</i> ρ	uladu s p	1.5ρ	1.5ρ	ΙΕΕΕ80 1.5 <i>C</i> ρ	1.5 <i>p</i>
F	ravděpodobnost fibrilace		Dalziel	Dalziel	Dalziel & upravená 479	479	V so	479	479	479	479
	Vyhodnocení		Stress & Strength	Stress & Strength	Stress & Strength	Stress & Strength		ALARP + Stress & Strength	Jedna hodnota - ALARP	Jedna hodnota - ALARP	Jedna hodnota - NA

Tab. 4-1 Souhrn aplikovaných pravděpodobnostních přístupů

# 5 TOK PROUDU ZEMÍ A MODELOVÁNÍ ZEMNIČŮ

Z fyzikálního hlediska samotné modelování uzemnění prakticky do dnes nedosáhlo jednotného obecného analytického řešení. Z podstaty věci se jedná o úlohu řešení elektromagnetického pole v trojrozměrném prostoru. Přestože již v roce 1861 [46] a později v roce 1865 [47] J.C. Maxwell odvodil soustavu 20 rovnic svazující elektrické a magnetické pole (známějších ve jejich vektorové čtyř-rovnicové Heavisidově podobě), jejich uplatnění v širší praxi prakticky dodnes nedosáhlo uspokojivého stavu. Je tomu tak především z důvodu, že jejich aplikace na konkrétní reálné případy vyžaduje řešení obtížného matematického aparátu a krom zjednodušených případů elektromagnetických polí je jejich použití na složitější případy prakticky neuskutečnitelné [48].

Pakliže je řešení skrze Maxwellovy rovnice vyžadováno, je výsledného řešení dosaženo buďto skrze

 rigorózní analytické řešení těchto rovnic obvykle při zavedení mnoha zjednodušení a předpokladů, které v podstatě vůbec umožní analytického řešení dosáhnout.

Nebo

 Za pomocí numerických metod, rovněž při použití mnoha zjednodušení. Využití numerických metod těží především z rozvoje počítačové techniky, která zdlouhavého numerického řešení umožňuje dosáhnout.

Při řešení obecného elektromagnetického pole v časoprostoru lze získat značného zjednodušení zanedbáním vlivu času na získané řešení. Jedná se tak o řešení časově proměnného pole propagujícím se s konečným časem, anebo propagujícím se s nekonečným časem – tzv. kvazi statické. Dalšími zjednodušeními jsou například osy či roviny symetrie, které umožnují snížit počet proměnných (tj. prostorovou dimenzi) řešeného problému. V případě řešení úloh zemničů lze dále vycházet z metod konstantního potenciálu zemniče, průměrného proudu zemničem atd. viz dále v kapitolách 5.1 a 5.2.

Pro řešení obecného elektromagnetického pole lze využít např. metod [48]

- Gaussova věta elektrostatiky.
- Metoda zrcadlení spolu s metodou superpozice.
- Výpočet pomocí Coulombova zákona.
- Přímá integrace Maxwellových rovnic.
- Separace proměnných.
- Momentová metoda (Moment Method).
- Metoda hraničních prvků (Boundary Element Eethod).
- Metoda konečných objemů (Finite Volume Method).
- Metoda konečných diferencí (Finite Difference Method).
- Metoda konečných prvků (Finite Element Method).

Jelikož aplikace numerických metod byla možná především až s postupným rozvojem výpočetní techniky, nabízely se na počátku hledání řešení pro modelování uzemnění jen zjednodušené analytické metody. Řešení složité prostorové úlohy tak bylo dosaženo při zavedení mnoha zjednodušujících předpokladů. V podstatě první náznaky řešení lze nalézt publikované Petersnem [45] vycházející z metody zrcadlení a pomocí Gaussova zákona elektrostatiky (ekvivalence mezi elektrickou indukcí v dielektriku a výpočtem odporu). Navrženým způsobem

tak bylo možné dosáhnout alespoň přibližného řešení této úlohy (získání odporu uzemnění). Úloha výpočtu odporu uzemnění na základě tohoto postupu tak v podstatě přešla v problém stanovení kapacity izolované elektrody stejného tvaru jako má zemnič umístěný ve vakuu. V průběhu dvacátých až přibližně po konec padesátých let dvacátého století pak na Petersna, ať již přímo či nepřímo, navázalo mnoho dalších autorů odvozením zjednodušených analytických vztahů pro stanovení elektrického odporu základních typů zemnících elektrod. Jednalo se o vztahy pro výpočet zemního odporu pro samostatné elektrody typu – vertikální tyč, horizontální tyč, horizontální kruh, kruhový disk, hvězdice tyčí o různém počtu paprsků atp. Mezi hlavní autory zde lze řadit Dwighta [49], [50], Ollendorfa [51], Rüdenberga [52], Schwartze [53] aj.

Použití zjednodušených vztahů má ovšem hned několik úskalí. Prvním a prakticky nejzávažnějším problémem je jejich platnost vždy jen pro jednu samostatnou elektrodu daného typu. Analytickým řešením je totiž prakticky nemožné odvodit vztahy i pro zemniče složené z mnoha těchto základních elektrod. Například tak zemnič složený z několika obvodových kruhů doplněný o vertikální tyče je zjednodušeným analytickým řešením prakticky nemožné odvodit. Tento problém byl obejit např. získáním přibližného řešení zavedením koeficientů využití [51], [54], či [65]. Jejich zavedení vychází z předpokladu, že jednotlivé základní typy zemničů tvoří z elektrického hlediska ,paralelní spojení dvou odporů, nicméně v důsledku jejich vzájemného ovlivňování jejich elektrickými poli dochází k nárůstu odporů jednotlivých základních elektrod. V důsledku vysoké matematické náročnosti [51] byly tyto koeficienty nejčastěji stanovovány empiricky z provedených měření. Tento způsob výpočtu uzemnění byl a dodnes je všeobecně uznávaným [64]. Dalšími úskalími tohoto přístupu je pak skoro až nemožnost postihnout všechny možné obměny tvarů zemničů, jejich prostorového uspořádání a v neposlední řadě také vliv nehomogenity půdy. Tak tedy například vztahy odvozené Dwightem [49] respektují i hloubku uložení elektrod v zemi, kdežto vztahy odvozené Rüdenbergem [52] a Schwartzem [53] jsou na hloubce uložení nezávislé. Dále vztahy Dwigtha, Rüdenberga i Schwartze jsou odvozeny pro homogenní typ půdy o jedné jediné rezistivitě. I přesto, že autoři si byli vědomi složitějšího složení půdy [52] skládajícího se z vrstev půdy o různých reszistivitách, tehdejší matematický a výpočetní aparát tyto problémy nedovedl v odvozených vztazích odpovídajícím způsobem respektovat. O několik let později pak Nahman ve svém časopiseckém příspěvku [55] publikoval modifikované analytické vztahy respektující jak nehomogenní složení půdy skrze korekční faktory, tak i různou hloubku uložení samotného zemniče. Nicméně jeho vztahy stále neřešily problém spojení více základních typů elektrod.

Rozvoj výpočetní techniky v druhé polovině dvacátého století přinesl převrat do mnoha vědeckých a inženýrských oblastí. Jinak tomu nebylo ani v oblasti výpočtů a modelování zemnících systémů. K průkopníkům zde lze řadit Dawalibiho, Giao, Sveraka, Meliopoulose, kteří povětšině navázali na teoretickou práci Sundeho [56] a implementovali analytické řešení do výpočetních programů. Je zapotřebí zdůraznit, že ač analytického řešení by bylo možné dosáhnout i dříve, tak jeho numerická náročnost se prakticky bez vysokých paměťových a výpočetních schopností neobešla a jeho aplikace "na papíře" by byla prakticky značně neefektivní až takřka utopická. Počínaje tak od 80-let dvacátého století lze vysledovat druhou etapu značného rozvoje v oblasti modelování zemnění (v počtu publikací). Mnoho autorů se snažilo využít značných výpočetních schopností počítačů a implementovali tak různá (různě zjednodušená) analytická řešení a metody pro řešení zemničů. S nástupem digitalizace vědeckých výstupů se pak později od této doby stává takřka nemožné sledovat všechny směry a všechny mnohdy i doposud publikující autory v důsledku jejich velkého množství. Nicméně lze sledovat určitý hlavní trend, který vychází ze zavedených zjednodušení, která byla použita při odvozování řešení elektromagnetické úlohy.

Prvotní řešení publikované Dawalibim [57] vycházela z řešení pouze elektrického pole. Sám Dawalibi později s Grcevem [58] řešení rozšířili o řešení i magnetického pole. Při řešení magnetického pole, a tedy především účinků střídavého pole, hraje pak zásadní úlohu frekvence tohoto pole. Vytvořené matematické modely zpravidla bývají limitovány frekvenčním pásmem ve kterém je řešení platné [54]. Modelování odezvy zemniče na přechodné jevy je až do dnešní doby relativně hojně řešeným tématem [54], [59]-[63] a dalo by se říci oborem, ve kterém nebylo dosaženo jednotného uspokojivého konsenzu.

Jelikož hlavním zdrojem rizika při vyhodnocování zemničů jsou právě vzniklé rozdíly potenciálů od poruchového proudu, tak lze předpokládat, že způsob výpočtu těchto potenciálů může značně ovlivnit samotné výsledky vyhodnocení. V následujících podkapitolách tak jsou prezentovány různé způsoby modelování pole v okolí zemničů s poukázáním na jejich případné úskalí. Jelikož s modelováním zemničů vcelku úzce souvisí také měření půdy a tvorba jejího odpovídajícího modelu, bude tomuto dále věnována samostatná kapitola. Výsledkem modelování zemničů je obvykle snaha získat **základní parametry zemniče**, z kterých lze usuzovat na funkční a bezpečností vlastnosti daného návrhu zemniče. K základním parametrům zemniče pak patří:

- Elektrický odpor/impedance zemniče.
- Nárůst potenciálu zemniče.
- Maximální dotykové napětí mesh voltage.
- Maximální krokové napětí.
- Rozložení potenciálu v okolí zemniče.
- Rozložení dotykových napětí v okolí zemniče.
- Rozložení krokových napětí v okolí zemniče.

# 5.1 Zjednodušené vztahy a koeficienty využití

Zjednodušené vztahy pro výpočet základních parametrů zemniče patří k nejstarším metodám a jejich aplikace je obvykle velice snadná. Analytické vztahy mají ovšem řadu nevýhod jako jsou

- Nemožnost stanovit skutečné plošné rozložení potenciálu v okolí zemniče.
- Nemožnost stanovit skutečné maximální dotykové a krokové napětí.
- Nevhodné modelování zemniče složeného z více základních druhů zemnících elektrod.
- Modelování vícevrstvého modelu půdy často není zahrnuto.
- Nejjednodušší vztahy nerespektují hloubku uložení zemniče.

# 5.1.1 Rüdenberg

Ač Rüdenbergovy vztahy [52] nerespektují hloubku uložení, tak jejich přínos lze spatřovat především v intuitivnosti jejich odvození. Rüdenberg při odvození vztahů pro výpočet zemničů vyšel ze vztahu pro intenzitu elektrického pole a proudové hustoty. Pro složitější zemniče pak využil metody segmentace s předpokladem stejného průměrného proudu podél celé délky elektrody spolu s následnou superpozicí potenciálu od všech segmentů. Nejjednodušším a obecně známým příkladem je odvození vztahu pro potenciál půlkulové elektrody zaražené do půdy o rezistivitě  $\rho$ . Příklad polokoule o poloměru *B* je vyznačen a obrázku Obr. 5-1.



Obr. 5-1 Kulová elektroda zaražená do země, Rüdenberg [52]

Při toku proudu I touto elektrodou je proudová hustota ve vzdálenosti x od středu polokoule

$$J = \frac{I}{2\pi x^2} \tag{5-1}$$

Intenzitu elektrického pole ve vzdálenosti x lze pak vyjádřit jako

$$E = \rho \cdot J = \frac{\rho I}{2\pi x^2} \tag{5-2}$$

Napětí mezi povrchem polokoule ve vzdáleností *B* a body na ekvipotenciále ve vzdálenosti *x* pak lze dopočíst jako křivkový integrál

$$U = \int_{B}^{x} E dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_{B}^{x} \frac{dx}{x^{2}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{B} - \frac{1}{x} \right] = V_{EPR} - V_{x}$$
(5-3)

Celkový nárůst potenciálu zemniče je pak rozdíl potenciálů na povrchu polokoule a v nekonečné vzdálenosti  $x = \infty$  jako

$$EPR = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{B} - \frac{1}{\infty} \right] = \frac{\rho I}{2\pi B}$$
(5-4)

Odpor takovéhoto zemniče je pak z Ohmova zákona

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{2\pi B} \tag{5-5}$$

V případě dvou elektrod v zemi je možné vyjít z principu superpozice potenciálů od obou elektrod zvlášť. Výpočet je proveden pro dvě elektrody o stejném poloměru  $B=B_1=B_2$ . Obě elektrody jsou polovinou svého povrchu uloženy v zemi o rezistivitě  $\rho$  a jednou elektrodou do země vtéká proud  $I_1$  a druhou ze země vytéká stejně velký proud  $I_2$ , přičemž tedy platí  $I=I_1=-I_2$ . Situace je vykreslena na Obr. 5-2. Obě elektrody jsou od sebe vzdáleny ve vzdálenosti 2z a pak potenciál  $V_x$  v bodě X vzdáleném od obou elektrod o y lze spočítat jako

$$V_x = V_1 - V_2 = \frac{\rho l_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{B_1} - \frac{1}{y} \right] - \frac{\rho l_2}{2\pi} \left[ \frac{1}{B_2} - \frac{1}{y} \right] = \frac{\rho l}{2\pi} \left[ \frac{1}{B} - \frac{1}{y} \right] + \frac{\rho l}{2\pi} \left[ \frac{1}{y} - \frac{1}{B} \right]$$
(5-6)

A po dalším zjednodušení

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{B} - \frac{1}{y} + \frac{1}{y} - \frac{1}{B} \right] = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{2}{y} \right] = \frac{\rho I}{\pi y}$$
(5-7)



Obr. 5-2 Dvě blízké kulové elektrody v zemi, překresleno podle Rüdenberg [52]

Pro odvození vztahů pro složitější tvary zemnících elektrod pak Rüdenberg využil segmentace a principu průměrného proudu každým segmentem spolu s metodou zrcadlení. Výsledný potenciál je pak dopočítaný superpozicí potenciálů od všech segmentů. Pro vertikální tyčový zemnič délky *l* rozdělený na *n* elementů platí

$$dl = \frac{l}{n} \tag{5-8}$$

Takovýto zemnič je vyobrazen na Obr. 5-3. Každý element injektuje do země průměrný poměrný proud I/n. Dílčí potenciál dV od jednotlivých segmentů v bodě V ve vzdálenosti y od daného segmentu lze pak vypočíst ze vztahu (5-3) jako

$$dV = \frac{\rho I}{4\pi \cdot n \cdot y} \tag{5-9}$$

Jednotlivé elementy tyče svírají s osou tyče a bodem V na povrchu země úhel  $\alpha$ , pro který z obrázku platí

$$\sin \alpha = \frac{y \cdot d\alpha}{dl} = \frac{y \cdot n \cdot d\alpha}{l}$$
(5-10)

Při dosazení vzdálenosti y z rovnice (5-10) do dílčího potenciálu dU (5-9) pak pro potenciál od dílčího zemniče platí

$$dV = \frac{\rho I}{4\pi \cdot n \cdot y} = \frac{\rho I}{4\pi \cdot n} \cdot \frac{n}{l} \cdot \frac{d\alpha}{\sin \alpha}$$
(5-11)

Výsledný sumární potenciál od všech dílčích elementů v bodě V je pak možné stanovit integrací předchozího vztahu (5-11) od limitních hodnot úhlu  $\alpha$  jako (+ $\beta$ ,- $\beta$ ). Pro tyč umístěnou na povrchu země jsou do integrace také zahrnuty zrcadlové elementy zemniče nad povrchem země, které jsou zavedeny pro zahrnutí vlivu okrajové podmínky konce rozhraní země-vzduch. Z principu této metody tak na tomto rozhraní dojde k symetrickému rozložení elektrického pole s nulovou tangenciální složkou (pole kolmé na rozhraní). Při zavedení těchto zrcadlových segmentů tak úhel  $\alpha$  nabývá hodnot od + $\beta$  do - $\beta$ , a je integrováno celkem 2*n* elementů tyče dvojnásobné délky 2*l*.

$$U = \frac{\rho I}{4\pi l} \int_{+\beta}^{-\beta} \frac{d\alpha}{\sin \alpha} = \frac{\rho I}{2\pi l} \ln \left( \cot \frac{\beta}{2} \right)$$
(5-12)



Obr. 5-3 Potenciál v okolí tyčové elektrody, Rüdenberg [52]

Potenciálové pole v okolí takovéhoto tyčového zemniče pak pro velké vzdálenosti *x* od středu tyče přechází v pole působené půlkulovým zemničem podle vztahu (5-3), kdy lze dokázat, že platí

$$\ln\left(\frac{1+\cos\beta}{\sin\beta}\right) \approx \cos\beta \approx \frac{l}{x}$$
 (5-13)

$$V = \frac{\rho I}{2\pi x} \tag{5-14}$$

Vztah (5-12) lze dále převést pro získání potenciálů na povrhu tyče do známějšího tvaru (5-15), kde pro malé poloměry a v porovnání s délkou tyče l platí

$$\cot\frac{\beta}{2} \approx \frac{2l}{a} \tag{5-15}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \tag{5-16}$$

Tento vztah (5-16) je stejný jaký je uvedený v příloze J mezinárodního standardu EN50522:2010 [2], dále také v podnikové normě PNE 33 0000-4:2011 [64], či v knize [65].

Rüdenberg pak využil obdobného způsobu pro odvození vztahů i pro další jiné typy zemnících elektrod. Při odvozování pak odvozoval vztahy pro zemniče umístěné hluboko pod povrchem, kde lze předpokládat proudovou hustotu do všech směrů stejnou. Pro zemniče umístěné poblíž povrchu pak doporučuje výsledný odpor vynásobit dvěma, jelikož proud z takovýchto elektrod se může šířit pouze jednou polovinou celého prostoru. Vztahy pro jiné typy elektrod odvozené Rüdenbergem jsou uvedeny v Tab. 5-1.

Rüdenberg dále upozorňuje, že půda nemusí být homogenní a tedy výsledky mohou být zatíženy chybou. Přesto, že Rüdenbergovy vztahy mohou posloužit jako alespoň přibližné základní vztahy pro návrh zemničů, jejich hlavní nedostatky lze spatřovat v

- Neúplném zahrnutí hloubky uložení elektrod.
- Absenci aplikovatelnosti na nehomogenní typy půdy.
- Absenci postupu pro zemniče složené z více základních typů elektrod.

Koule	$R = \frac{\rho}{2\pi D}$	
Tyč	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{2L}{r}$	
Pásek	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L}{2r}$	
Pásek, obdélník, a delší strana	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{\frac{a}{2}}$	
Kruhový disk	$R = \frac{\rho}{4D}$	
Kruh	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{4D}{r}$	
Pro elektrodu u povrchu	$R_0 = 2R$	
<i>D</i> průměr kruhu/koule, <i>L</i> délka tyče/pásku, <i>r</i> poloměr průřezu vodiče, <i>a</i> delší strana páskového vodiče, 2 <i>r=a</i> /4		

Tab. 5-1 Zemní odpor základních zemnících elektrod, Rüdenberg [52]

#### 5.1.2 Dwight

Dwight [49], [50] při odvozování vztahů pro výpočet zemniče vyšel ze dvou stěžejních principů.

- 1. Pro výpočet kapacity různých tvarů elektrod lze vyjít z předpokladu rovnoměrného rozložení náboje na povrchu elektrody [68]. Tímto předpokladem může docházet k odchylce oproti řešení se skutečným rozložením náboje v řádu jednotek procent [50].
- Při uvážení konstantního náboje na povrchu elektrody lze pak z Gaussova zákona elektrostatiky a Ohmova zákona odvodit závislost odporu elektrody v závislosti na její kapacitě [45], viz. následující vztahy (5-17) a (5-18), více k odvození v příloze III uvedené publikace.

$$\rho \iint i_n ds = \iint E_n ds \tag{5-17}$$

Předchozí vztah po dalších úpravách přejde v

$$R = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{C} = \frac{\rho}{4\pi C} \tag{5-18}$$

kde *R* je elektrický odpor elektrody (zemní odpor),  $\rho$  je rezistivita půdy, *C* je elektrostatická kapacita elektrody.

Pro výpočet odporu základních zemnících elektrod je tak zapotřebí stanovit jejich kapacitu. Např. pro válcovou tyč podle Obr. 5-4 lze při předpokladu rovnoměrného rozložení náboje q stanovit potenciál [69] v bodě P od části tyče dy jako

$$\frac{qdy}{a} \left[ \frac{a}{r} - \frac{1}{2^2} \cdot \frac{a^3}{r^3} \left( \frac{3y^2}{r^2} - 1 \right) + \cdots \right]$$
(5-19)

kde *a* je poloměr elektrody, *y* je vzdálenost bodu *P* a elementu *dy* 

$$r^2 = a^2 + y^2 \tag{5-20}$$



Obr. 5-4 Válcová elektroda, pohled shora, Dwight [50]

Po integraci potenciálů od všech elementů přes celou délku tyče, následné úpravě získaných logaritmů lze získat vztah pro kapacitu tyče jako

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 + 0.5 \frac{a}{L} - 0.06 \frac{a^2}{L^2} + 0.002 \frac{a^4}{L^4} \right)$$
(5-21)

přičemž byl integrován jen první člen vztahu (5-19).

Jelikož pro zemnící tyče platí L >> a, tak členy obsahující tento poměr i s vyššími mocninami lze zanedbat a vztah (5-21) pak po dosazení do (5-18) přejde do známé formule

$$R = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{C} = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$
(5-22)

Odvození kapacity výše bylo provedeno pro horizontální tyč, v případě vertikální tyče je pak její jedna polovina uvažována jako zrcadlová podle metody zrcadlení. Proud vertikální tyčí je pak poloviční jako tyčí horizontální, a tak výsledný vztah pro vertikální tyč je

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \tag{5-23}$$

Tento výsledný vztah je hojně využívaný a citovaný především v ,americké vědecké a inženýrské komunitě navázané na sdružení IEEE. I samotný IEEE standard 80 [6] věnující se uzemnění tento vztah cituje. Je zde dobré zmínit, že pro vertikální tyč se tak v literatuře vyskytují dva odlišné vztahy (5-16) a (5-23). Porovnání těchto dvou vztahů je pak provedeno v tomto dokumentu v kapitole 5.3.1.

Dwight ve svém příspěvku dále odvodil vztahy pro výpočet kapacit~odporů i dalších zemnících elektrod viz následující Tab. 5-2.

Výhodou Dwightových vztahů oproti Rüdenbergovým je pak postihnutí i hloubky uložení elektrod. Nevýhodami ovšem přetrvává

- Absenci aplikovatelnosti na nehomogenní typy půdy.
- Absenci postupu pro zemniče složené z více základních typů elektrod.

Jedna tyč	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$				
Pásek	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{h} - 2 + \frac{2h}{L} - \frac{h^2}{L^2} + \frac{h^4}{2L^4} \cdots \right)$				
Pásek ve tvaru L	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln\frac{2L}{r} + \ln\frac{L}{h} - 0.2373 + \frac{0.4292h}{L} + \frac{0.414h^2}{L^2} - \frac{0.6784h^4}{L^4} \cdots \right)$				
Pásek ve tvaru Y	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{h} + 1,071 - \frac{0,418h}{L} + \frac{0,952h^2}{L^2} - \frac{0,864h^4}{L^4} \cdots \right)$				
Pásek ve tvaru kříže	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{h} + 2,912 - \frac{2,142h}{L} + \frac{2,58h^2}{L^2} - \frac{2,32h^4}{L^4} \cdots \right)$				
Pásek ve tvaru hvězdy 6	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left( \ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{h} + 6,851 - \frac{6,256h}{L} + \frac{7,032h^2}{L^2} - \frac{7,84h^4}{L^4} \cdots \right)$				
Pásek ve tvaru hvězdy 8	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left( \ln\frac{2L}{r} + \ln\frac{L}{h} + 10,98 - \frac{11,02h}{L} + \frac{13,04h^2}{L^2} - \frac{18,72h^4}{L^4} \cdots \right)$				
Kruh	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left( \ln \frac{4D}{r} + \ln \frac{2D}{h} \right)$				
Kruhový disk	$R = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{8\pi h} \left( 1 - \frac{7r^2}{48h^2} + \frac{33r^4}{640h^4} \cdots \right)$				

Tab. 5-2 Vztahy pro zemní odpory různých typů elektrod, Dwight [50]

D průměr kruhu/koule, Ldélka tyče/pásku/paprsku, r poloměr průřezu vodiče, adelší strana páskového vodiče,  $2r{=}a/4, h$ hloubka uložení

Pozn. Pro porovnatelnost vztahů mezi kapitolami byly vztahy upraveny na jednotné značení, pro lepší pochopení uvedených řad v Dwightových vztazích je nezbytné vyjít z originálního znění v článku [50]

# 5.1.3 Osolsobě

Za autory známé v československém prostředí je zde dobré zmínit Jana Osolsoběho a Mirko Zapletala. Jejich stěžejní publikace z roku 1964 [65] věnovaná celá zemnění ve své kapitole XII uvádí výčet vzorců viz Tab. 5-3. Osolsobě při odvozování vztahů použil obdobných metod jako Rüdenberg, nicméně jeho vztahy doplnil i o členy závislé na hloubce uložení elektrod, které odvodil z metody zrcadlení. Osolsoběho vztahy se tak od Rüdenbergových liší v podstatě jen v dalších členech zavádějících do výpočtu i hloubku uložení zemniče. Odlišnosti Osolsoběho vztahů pak mohou být způsobeny také čerpáním z východoevropské a tehdy sovětské literatury.

Osolsobě se dále zabýval i problematikou použití vztahů pro zemniče složené z více základních typů zemnících elektrod a stanovení koeficientů využití. Pro některé uspořádání zemničů je možné tyto koeficienty vyčíslit i analyticky, ovšem jedná se obvykle o nějakým způsobem souměrná řešení. Osolsobě dále pro řešení větších zemničů citoval metodu řešení pomocí matice vlastních a vzájemných potenciálů, tedy převedení rozsáhlých zemničů na soustavu tyčových zemničů. Řešení pomocí koeficientů využití je popsáno v samostatné kapitole 5.1.5. Řešení pomocí potenciálové matice je relativně korektním řešením, nicméně předpokládá konstantní rozložení proudu podél celých jednotlivých elektrod, což ve skutečnosti není správný

předpoklad (viz Dawalibiho analytické řešení kapitola 5.2.2). Pro zemnič bez vykazující známky symetrie se pak řešení dále komplikuje.

K nevýhodám Osolsoběho vztahů tak lze přiřadit obdobné problémy jako u předchozích autorů

- Absenci aplikovatelnosti na nehomogenní typy půdy.
- Částečné či neúplné řešení složitějších zemničů složených z více základních typů elektrod.

Tab. 5-3 Přehled vzorců pro výpočet zemních odporů, Osolsobě [65]

Koule, povrch	$R = \frac{\rho}{\pi D}$		
Koule v hloubce	$R = \frac{\rho}{2\pi D} \left( 1 + \frac{D}{4h} \right)$		
Kruhový disk, povrch	$R = \frac{\rho}{2D}$		
Kruhový disk, hloubka	$R = \frac{\rho}{4D} \left[ 1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{\sqrt{4h^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}} \right]$		
Tyč	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{r}$		
Pásek, povrch	$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{L}{r}$		
Pásek, hloubka	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{L}{r} + \ln \frac{L}{2h} \right)$		
Kruh, povrch	$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{r}$		
Kruh, hloubka	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left( \ln \frac{4D}{r} + \ln \frac{\pi D}{2h} \right)$		
Pásek ve tvaru kříže, povrch	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{L}{r} + 1 \right)$		
Mřížová síť	$R = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{L}$		
<i>D</i> průměr kruhu/koule, <i>L</i> délka tyče/pásku/paprsku, <i>r</i> poloměr průřezu vodiče, <i>h</i> hloubka uložení			

### 5.1.4 EN 50522

Pro dotvoření výčtu výpočtových vztahů je zde zařazena i krátká kapitola pojednávající i o výpočtových vztazích uvedených v současnosti platném mezinárodním standardu EN 50522:2010 [2]. Vztahy uvedené tímto standardem se nejblíže podobají vztahům Rüdenberga.

Standard se metodám výpočtu věnuje v podstatě jen okrajově. Uvedené vztahy vykazují stejné nedostatky jak Rüdenbergovy. Příčinu rozdílů oproti jiným vztahům ani není jednoduché dopátrat, neboť norma necituje dokument, kde by bylo publikováno odvození těchto vztahů.

Tab. 5-4 Vztahy pro výpočet uzemnění, EN50522 [2]

Mříž	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \sqrt{\frac{4ab}{\pi}}}$	
Pásek	$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{L}{r}$	
Kruh	$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{\pi D}{r}$	
Tyč	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{r}$	
D průměr kruhu, L délka tyče/pásku, r poloměr průřezu vodiče, a, b rozměry mřížového zemniče		

### 5.1.5 Koeficienty využití

V případě, že se zemnič skládá z více spojených elektrod, tak tyto se navzájem ovlivňují svými vzájemnými potenciály. To má za následek, že výsledný odpor těchto elektrod neodpovídá jejich prosté paralelní kombinaci, nýbrž je v důsledku těchto potenciálů o něco větší. Autoři mnohých analytických vztahů si tohoto faktu byli vědomi a vzhledem k jejich dostupným prostředkům tento nedostatek řešili pouze zjednodušeně skrze koeficienty využití.

Zjednodušeně lze princip koeficientů využití popsat na soustavě tyčových zemničů podle Obr. 5-5 (viz např. Osolsobě [65]). Pakliže odpor jedné samostatné tyče je označen jako  $R_0$ , odpor jejich kombinace pokud by se neovlivňovaly svými potenciály jako  $R_\infty$  a skutečný odpor pokud se vzájemně ovlivňují jako R, pak pro celkový počet tyčí n lze koeficient využití  $\eta$  definovat jako

$$R_{\infty} = \frac{R_0}{n} \tag{5-24}$$

$$\eta = \frac{R_{\infty}}{R} = \frac{R_0}{nR} \tag{5-25}$$



Obr. 5-5 Soustava, symetricky rozmístěných tyčových zemnících elektrod, podle [65]

V případě, že by se svými potenciály neovlivňovaly, tak takováto soustava tyčí defacto představuje n paralelních cest pro proud tekoucí do země a tedy vztah (5-24) je zjednodušenou

formou vztahu pro paralelní kombinaci více odporů. V obecnější formě pro paralelní kombinaci *n* různých typů elektrod je možné jej zapsat jako

$$\frac{1}{R_{\infty}} = Y_{\infty} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{Y_{i}}}$$
(5-26)

Pro uvedenou symetrickou soustavu tyčových zemničů je možné z jejich potenciálů analyticky odvodit funkci [65] pro výpočet velikosti koeficientu využití v závislosti na počtu a velikostí takto rovnoměrně rozložených elektrod jako

$$\eta = \frac{R_{\infty}}{R} = \frac{1}{1 + \frac{\rho}{2\pi \cdot 2r_0 \cdot R_{\infty}} \cdot f(n)}$$
(5-27)

kde

$$f(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{\sin\frac{k\pi}{n}}$$
(5-28)

Význam veličin viz obrázek.

Výsledný skutečný zemní odpor soustavy paralelně spojených tyčí lze při znalosti koeficientu využití vypočíst jako

$$R = \frac{R_0}{n \cdot \eta} \tag{5-29}$$

Problém metody použití koeficientů využití spočívá v počtu parametrů, na kterých tyto koeficienty závisí. Je nesmírně komplikované postihnout těmito koeficienty všechny možné kombinace zemničů o různých velikostech a také umístěných v různých složeních půdy. V rámci spolupráce Ústavu elektroenergetiky a společností EGC-EnerGoConsult ČB byla autorem této práce vypracována studie [70], věnující se simulaci různých kombinací zemničů za účelem zpřesnění koeficientů uvedených v předešlé 3. edici podnikové normy PNE 33 0000-4(3) [72]. Výsledky této studie pak posloužily jako podklady pro 4. edici této podnikové normy [64]. V rámci této studie byly různé kombinace zemničů simulovány pomocí programového prostředí Ansoft Maxwell [73]. Tento software pro vyřešení rozložení elektromagnetického pole používá metodu konečných prvků, viz kapitola 5.2.1. Současné (a předchozí) znění podnikové normy celkem zavádí 8 (6) následujících koeficientů využití

- Koeficient využití pásků/paprsků η<sub>pn</sub>.
- Koeficient využití týčí  $\eta_t$ .
- (Koeficient využití kombinace obvodového a tyčových zemničů  $\eta_{ot}$ ).
- Koeficient využití kombinace obvodového a paprskových zemničů  $\eta_{op}$ .
- Koeficient využití kombinace dílčích uzemnění  $\eta_{12}$ .
- (Koeficient využití kombinace třetího kruhového zemniče  $\eta_{123}$ ).
- Koeficient využití základového a obvodového zemniče  $\eta_{zo}$ .
- Koeficient využití kombinace železobetonového základu a paprsků η<sub>zp</sub>.

Hodnoty těchto koeficientů podle starého a nového znění podnikové normy jsou uvedeny v Tab. 5-5.

V rámci provedené studie byly koeficienty využití stanoveny jen pro část všech možných řešení. Hlavním cílem studie pak bylo zkoumání jejich závislosti na rezistivitě půdy. Množství možností uspořádání zemniče zde bude demonstrováno jen na několika vybraných příkladech.

Koeficient využití	Předchozí vydání	Nové vydání	
	PNE 33 0000-4(3):2011	PNE 33 0000-4(4):2018	
$\eta_{ m pn}$	1/1/0.9/0.836	1/0.87/0.78/0.71	
$\eta_{ m t}$	Upravený graf průběhu pro růz	né $a/L$ a $n$	
$\eta_{ m ot}$	Nebyl zaveden	0.63	
$\eta_{ m op}$	0.9	0.9	
$\eta_{12}$	0.7	0.7	
η <sub>123</sub>	Nebyl zaveden	0.65	
$\eta_{zo}$	0.7-0.8	0.7-0.8	
η <sub>zp</sub>	0.9	0.78	

Tab. 5-5 Koeficienty využití podle starého a nového znění podnikové normy energetiky

#### 5.1.5.1 Obvodový zemnič doplněný o paprskové zemniče

Jako první příklad lze uvážit uzemnění prefabrikované trafostanice podle následujícího Obr. 5-6 (též řešené v rámci PNE jako ukázkový příklad)



Obr. 5-6 Prefabrikovaná transformovna 22/04 kV, PNE 330000-4(4) [64]

Zemnič je v tomto případě řešen jako obvodový, doplněný o dva zemnící pásky a dále je u vstupu přidán ekvipotenciální práh pro vylepšení průběhu potenciálu a zvýšení bezpečnosti u vstupu. První komplikace, která zde vzniká je, že oba 25 m dlouhé pásky nejsou svými středy u sebe, ale jsou od sebe posunuté o 2,98 m. Výpočet takovéhoto zemniče se podle PNE provede jakoby byly páskové zemniče spojené jedním svým koncem viz. Obr. 5-7 s koeficientem využití  $\eta_{pn}$ . Efekt tohoto posunu pásků spolu s přítomností obvodového zemniče se pak "zahrne" pomocí koeficientu využití pro obvod a paprsky  $\eta_{op}$ . Jelikož  $\eta_{op}$  nikterak neurčuje, pro jaké pozice pásků a jejich počet je definován (v rámci studie byl definován pro pásky jejichž podélná osa leží na

*pomyslném středu obvodového zemniče)*, lze jen s těží usuzovat, zda by takto zavedený koeficient platil i pro jiné případy, např.

- Pásky spojené svými okraji.
- Jiný počet pásků (4,8 atp).
- Pásky umístěné v rozích zemniče, excentricky.
- Pásky směřující do jiných směrů.
- Pásky nebo obvod umístěné v různých hloubkách.
- Pásky i obvod mající různě velké rozměry.

Další komplikace spočívá v použití ekvipotenciálního prahu. Ten není do výpočtu nijak zaveden. Toto zjednodušení je sice možné, neboť jeho přítomnost pravděpodobně nebude mít značný vliv na samotný odpor výsledného zemniče a konečné řešení oproti navrhovanému bude takto vždy lepší, ovšem takovéto řešení povede vždy k mírnému předimenzování.

Poslední komplikace nastává v důsledku nehomogenního složení půdy. Nejčastěji používaným modelem půdy je horizontálně dělený s dvěma vrstvami o různých rezistivitách, viz kapitola 5.1.6. V případě tohoto modelu půdy se mohou měnit až tři parametry, kterými jsou

- Rezistivita povrchové vrstvy  $\rho_1$ .
- Rezistivita podložní vrstvy  $\rho_2$ .
- Hloubka povrchové vrstvy H.

Jelikož elektrické pole je při řešení metodu zrcadlení svázané jen skrze prostorové rozložení zemniče, hloubku povrchové vrstvy a poměrem obou rezistivit, v mnoha případech pak není zapotřebí řešit všechny možné kombinace rezistivit půdy, ale jen dané poměry obou rezistivit vyjádřené koeficientem odrazu (5-45)  $K \in (-1, 1)$ , viz kapitola 5.1.6.



Obr. 5-7 Rozložení páskových zemničů pro výpočet koeficientů využití

V rámci uvedené studie pak byly provedeny simulace postihující alespoň některé z uvedených problémů. Pro ilustraci je rozložení pole v okolí obvodového zemniče doplněného 4 paprsky

vykresleno na Obr. 5-8. Ze závislostí koeficientu využití obvodového a paprskových zemničů na rozměrech zemniče Obr. 5-9 je pak zřejmé, že tento je závislý prakticky na všech měněných parametrech:

- Nejsilnější závislost lze pozorovat na měnící se délce pásku (pro změnu délky pásku o 10 m dojde ke změně o jednu desetinu koeficientu využití).
- Další nejvýraznější závislost lze pozorovat pro měnící se velikost obvodového zemniče, která způsobuje zmenšení strmosti (směrnice) růstu koeficientu využití pro měnící se délku paprsku. Je zde také patrný posun společného průsečíku těchto křivek závislý na posledním měněném parametru, čímž byla hloubka uložení (společný bod pro hloubku 0,3 m pro délku tyče L ~ 7,5 m a pro hloubku 0,6 m pak L ~ 8,5 m). Tato závislost je slabší a její vliv na hodnotu koeficientu využití pro simulovanou oblast dosahuje jen přibližně pěti setin.
- Samotná hloubka uložení ve spojení s měnící se délkou paprsku L pak má vliv offsetu průběhu koeficientu využití o přibližně 5 setin.



*Obr. 5-8 Rozložení pole v okolí obvodového zemniče doplněného o paprskové zemniče, podle* [70] pro stanovení koeficientu využití  $\eta_{op}$ 

Poslední závislostí, v uvedené studii pouze zmiňovanou, je pak závislost na parametrech modelů půdy. Předchozí výsledky byly uvedeny pro homogenní model půdy. V rámci provedené studie [70] pak bylo jasně prokázáno, že koeficienty využití jsou pro homogenní model půdy  $(\rho_1 = \rho_2)$  na jeho rezistivitě nezávislé. V případě ovšem, kde je stejný zemnič umístěn do dvouvrstvého modelu půdy, již tyto koeficienty jsou na rezistivitě závislé. Toto je patrné z Obr. 5-10 a Obr. 5-11, kde jsou vykresleny závislosti koeficientu využití 3 a 4 paprskových zemničů podle Obr. 5-7 pro měnící se dvouvrstvý horizontální model půdy. Z výsledků je zřejmé, že koeficient využití paprskových zemničů  $\eta_{pn}$  je silně závislý na poměru rezistivit obou vrstev vyjádřených koeficientem odrazu *K*, což v řešené oblasti vcelku malých koeficientů odrazu od -0,33 po 0,33 způsobovalo rozptyl koeficientu využití až cca o hodnotu 0,15. Na výsledek má také vliv hloubka povrchové vrstvy. Z výsledků je zde patrná změna trendu v oblasti, kdy je zemnič umístěn v blízkosti této hloubky (v simulacích podle obrázků byl zemnič umístěn v hloubce 0,4 m a byly simulovány hloubky povrchových vrstev 0,2; 0,5; 1; 2 a 5 m).



Obr. 5-9 Závislost koeficientu využití kombinace obvodového zemniče a 4 páskových zemničů na délce paprsku L pro různé hloubky uložení zemniče a pro různé rozměry obvodového zemniče



Obr. 5-10 Koeficient využití tří paprskových zemničů L = 15 m, v závislosti na parametrech dvouvrstvého modelu půdy



*Obr. 5-11 Koeficient využití čtyř paprskových zemničů* L = 15 m, v závislosti na parametrech dvouvrstvého modelu půdy

Jak bylo zmíněno, tak při výpočtu takovéhoto zemniče se využije pro samotné pásky nejprve koeficientu využití pro paprskové zemniče  $\eta_{pn}$  uspořádané podle Obr. 5-7. Pro utvoření představy je pak výčet zde doplněn o závislost tohoto druhého koeficientu využití na délce a hloubce uložení samostatných paprsků, Obr. 5-12 a Obr. 5-13. Z obou obrázků je zřejmé, že v případě dlouhých paprsků se rozptyl výsledného skutečného koeficientu využití v závislosti na proměnné hloubce snižuje a může dosahovat řádově rozdílu o jednu desetinu. V případě výpočtu s krátkými paprsky je ovšem patrný nárůst rozptylu skutečného koeficientu využití s měnící se hloubkou uložení paprsků. Jelikož výpočet je obvykle zjednodušován tak, že je vzata jen jedna ("univerzální") průměrná hodnota koeficientu využití a ta je použita na prakticky všechny rozložení zemničů, je pak zřejmé, že takovýto výpočet zemničů může dosahovat značné chyby.



*Obr.* 5-12 Závislost koeficientu využití 2 paprskových zemničů na délce paprsku a hloubce jejich  $uložení \eta_{pn}$ 



*Obr. 5-13 Závislost koeficientů využití 4 paprskových zemničů na délce paprsku a hloubce jejich uložení η<sub>pn</sub>* 

#### 5.1.5.2 Tyčové zemniče

Koeficienty využití tyčových zemničů spolu s obvodovými a páskovými zemniči jsou postiženy obdobnými chybami jako koeficienty využití paprskových zemničů popsané v předešlé kapitole 5.1.5.1.

Koeficient využití pro samostatně spojené tyčové zemniče umístěné v homogenní půdě podle Obr. 5-14 je možné stanovit i analyticky jak bylo popsáno na začátku podkapitoly 5.1.5 vztahy ( 5-27 ) a ( 5-28 ). Situace začíná být opět komplikovanější v případě nehomogenní půdy, kombinací s obvodovými a dalšími zemniči či nesymetrickým rozložením tyčových elektrod. Prvním z problémů je, že při výpočtu se nejprve uvažuje, že tyče jsou zatlučeny tak, že jeden jejich konec je na povrchu země a dosahují tedy jen do hloubky své délky L (viz Obr. 5-14). V reálných případech lze ovšem předpokládat, že tyče jsou zakopány až v hloubce umístění obvodového zemniče h, tedy svým spodním koncem dosahují až hloubky L+h (viz Obr. 5-15) a jejich horní konec se nachází v hloubce h. Koeficient využití, tak jak je uveden v podnikové normě, je ovšem odvozen jako by tyče byly zatlučeny na povrchu.

Dalším problémem stanovení koeficientů využití zemničů spolu s obvodovými zemniči může být v samotné pozici umístění tyčových zemničů, či kombinace složitější zemnící soustavy. Jako příklad zde lze uvést zemnící soustavu kioskové zemnící soustavy podle Obr. 5-15. Tato zemnící soustava se sestává ze základového zemniče spolu s obvodovým zemničem doplněným o 4 tyčové zemniče. Soustava je dále doplněna o ekvipotenciální práh pro zlepšení průběhu potenciálu u vstupu do stanice. Jak je z rozložení zemniče z obrázku patrné tak tyče nejsou umístěny v rozích obvodového zemniče. Dalším problémem je pak způsob, jakým je zaveden koeficient využití obvodového zemniče a tyčových zemničů  $\eta_{ot}$ . Tento uvažuje samostatný obvodový zemnič doplněný o tyčové zemniče. V případě, že je celá soustava dále ovšem doplněna o základový zemnič, má tento vliv na hodnotu skutečného koeficientu využití. Ač v případě tyčových zemničů nebyly provedeny detailnější studie všech možných obměn zemnící soustavy, lze i přesto opět očekávat, že tento koeficient bude záviset na:

- Tvaru obvodového zemniče.

- Velikosti obvodového zemniče.
- Hloubce uložení obvodového zemniče.
- Délce tyčových zemničů a také hloubce jejich zaražení.
- Rozmístění tyčových zemničů (po obvodu/libovolně; symetricky/nesymetricky).
- Přítomnosti dalších zemnících elektrod (základový zemnič, paprsky atp.).
- Nehomogenním modelu půdy.



*Obr. 5-14 Stanovení koeficientu využití tyčových zemničů*  $\eta_t$ 



Obr. 5-15 Kombinace tyčových zemničů spolu s základovým a obvodovým zemničem doplněným o ekvipotenciální práh

### 5.1.5.3 Shrnutí problematiky použití koeficientů využití

Jak bylo tedy uvedeno, použití koeficientů využití jednoznačně umožňuje zpřesnit návrh zemniče oproti použití samostatných základních vztahů podle kapitol 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4. Nerespektování vzájemného vlivu potenciálů blízkých elektrod a výpočet prostou paralelní kombinací by vedl k příliš příznivým výsledkům. Podle PNE [64] lze pro většinu praktických aplikací zemničů předpokládat koeficienty využití v rozmezí 0,6-1. V nejhorším případě by tak nerespektování tohoto vlivu mohlo vést k poddimenzování návrhu až o 40 %, viz (5-30). V případě vícenásobné kombinace zemnících elektrod by toto poddimenzování mohlo být ještě větší neboť např. jeden koeficient využití je již zahrnut a vstupuje do dalšího kroku výpočtu s dalším koeficientem využití viz 5.1.5.1 (stanovení nejprve odporu tyčových zemničů koeficientem využití  $\eta_{t}$  a následné použití druhého koeficientu využití  $\eta_{op}$ ).

Na druhou stranu je nezbytné říci, že použití jedné průměrné hodnoty koeficientu využití nemůže nikdy postihnout všechny možné obměny zemniče, na jejichž parametrech je návrh zemniče závislý. Z provedených analýz, lze předpokládat, že vlivem délkových rozměrů zemničů může chyba koeficientu využití v absolutních hodnotách dosahovat až cca 0.3. Vlivem dvouvrstvého modelu půdy pak tato chyba může být okolo 0.1, ovšem nejspíše i více pro větší poměry rezistivit. Kombinovanou chybu při využití koeficientů využití tak lze předpokládat cca 0.3 od délkových rozměrů + 0.1 od modelu půdy což je celková kombinovaná chyba až 0.4, které

může podle (5-30) odpovídat např. chyba určení zemního odporu až 40 %. Tuto problematiku by bylo dobré doplnit o podrobnější analýzu možností dvouvrstvých modelů a rozměrů zemničů pro zpřesnění. Výše uvedené závěry byly autorem v mírně obměněné podobě prezentovány v konferenčních příspěvcích [74], [75].

$$R_{121} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{0.6} = 1.67 \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$
$$R_{122} = \frac{1}{1} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$
$$\Delta R = \frac{R_{122} - R_{121}}{R_{121}} = \frac{1 - 1.67}{1.67} = -0.40$$
(5-30)

#### 5.1.6 Složení půdy a Wennerovo měření

Ač se půda nemusí na první pohled jevit jako vodič, tak je nezbytné zmínit, že rezistivita půdy může nabývat od několika jednotek  $\Omega$ m až po desetitisíce  $\Omega$ m. Průtok proudu zemí je pak zajištěn obsahem volných nosičů náboje v půdě jako jsou rozpuštěné různé minerály a soli. Vodivost půdy je dále závislá na obsahu vlhkosti v půdě, která přispívá ke zvýšené pohyblivosti nosičů náboje v půdě. Přibližný rozsah rezistivit je uveden v Tab. 5-6. Detailnější rozbor různých druhů půdy lze pak nalézt např. v [6], [54], [56], [65], [76], [94]. Vliv vlhkosti, teploty a obsahu soli v půdě na její rezistivitu je vyobrazen na Obr. 5-16. Vliv ročního období na rezistivitu půdy je vyobrazen na Obr. 5-17 v podobě korekčního součinitele pro eliminaci tohoto vlivu.

Tab. 5-6 Rozsah rezistivit, IEEE 80 [6]

Druh půdy	Přibližná rezistivita (Ωm)
Mokrá organická půda	10
Vlhká půda	100
Suchá půda	1000
Kamenné podloží	10000

Je zcela logické, že půda není tvořena velkými homogenními celky, ale různě velkými celky různě promíchaných typů hornin. Míchání různých vrstev lze obvykle pozorovat ve více směrech a to tedy jak v horizontálním (Obr. 5-18, Obr. 5-20) tak i vertikálním (Obr. 5-19).



Obr. 5-16 Závislost rezistivity půdy na vlhkosti, teplotě a obsahu soli, IEEE 80 [6]



Obr. 5-17 Závislost korekčního součinitele pro eliminaci závislosti rezistivity půdy na ročním období, Kočvara [71]



Obr. 5-18 Vrstvy podloží, Main Street, Cambridge, Rüdenberg [52]



Obr. 5-19 Průběh rezistivity ve vertikálním půdním vrtu, Dawalibi [94]



Obr. 5-20 Vrstvy půdy Yellow House Canyon Area, Blumentritt [77]

Parametry půdy do značné míry ovlivňují elektrické parametry zemničů, jako je jejich zemní odpor, rozložení potenciálu při průchodu proudu v jejich okolí atp. Jak bylo uvedeno v kapitolách 5.1.1 až 5.1.5, tak již pro alespoň zjednodušený výpočet zemničů je do výpočtu zapotřebí znát elektrickou rezistivitu půdy.

Nejznámější metodou pro stanovení rezistivity půdy je metoda nazvaná po svém autorovi a to čtyř-elektrodové měření podle Franka Wennera [78]. Wenner pro měření rezistivity navrhnul čtyř-elektrodové měření s rozmístěním elektrod v řadě se stejnými rozestupy o velikosti *a*, viz Obr. 5-21.



Obr. 5-21 Rozmístění čtyř-elektrodového měření půdy podle Wennera, podle [79]

Při tomto měření jsou elektrody zaraženy do hloubky *b* a jsou od sebe vzájemně vzdáleny o rozestup *a*. Mezi obě krajní elektrody je připojen externí zdroj, pomocí kterého teče zemí proud a mezi dvěma prostředními elektrodami je měřeno napětí. Za předpokladu, že elektrody jsou od sebe dostatečně vzdáleny pak v místě potenciálních elektrod lze předpokládat již vertikálně konstantní proudovou hustotu a intenzitu elektrického pole (přibližné do hloubky rozestupu elektrod *a*) a tedy při známém injektovaném jednotkovém proudu *I* a známém rozdílu potenciálů mezi prostředními elektrodami lze stanovit odpor válcové masy půdy o délce rozestupu elektrod *a* o poloměru *a*.

Při odvození vztahu pro výpočet rezistivity půdy z výsledků měření Wenner vyšel z metody superpozice a metody zrcadlení. Při odvození tohoto vztahu lze vyjít ze vztahu pro výpočet potenciálu kulové elektrody umístěné v půdě. Ve vztazích (5-3) a (5-4) byly odvozeny výpočty potenciálů v okolí půlkulové elektrody umístěné na povrchu půdy. V případě, že je elektroda umístěna celá v zemi, bude proudová hustota poloviční, neboť proud z elektrody může odtékat oběma polokulovými plochami elektrody a tedy elektrický potenciál kdekoliv v půdě o rezistivitě  $\rho$  od takovéto elektrody ve vzdálenosti *x* bude

$$\varphi = \frac{\rho I}{4\pi} \cdot \frac{1}{x} \tag{5-31}$$

Pro nalezení napětí mezi dvěma středními elektrodami (2, 3 podle Obr. 5-22) je zapotřebí provést superpozici potenciálů od krajních proudových elektrod a od jejich zrcadlových obrazů (1, 4, 5, 6). Označení elektrod spolu s označením vzdáleností je vykresleno na následujícím Obr. 5-22.



Obr. 5-22 Diagram rozložení Wennerova čtyř-elektrodového měření rezistivity půdy, [78]

Rozdíl napětí mezi potenciálovými elektrodami bude ze superpozice originálů a obrazů potenciálů podle (5-31) s příslušnými vzdálenostmi jako

$$U = U_{P1} - U_{P2}$$

$$U = \frac{\rho I}{4\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{52}} + \frac{-1}{r_{42}} + \frac{-1}{r_{62}} \right) - \left( \frac{-1}{r_{43}} + \frac{-1}{r_{63}} + \frac{1}{r_{13}} + \frac{1}{r_{53}} \right) \right]$$

$$U = \frac{\rho I}{4\pi} \left[ \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{13}} - \frac{1}{r_{42}} + \frac{1}{r_{43}} + \frac{1}{r_{52}} - \frac{1}{r_{53}} - \frac{1}{r_{62}} + \frac{1}{r_{63}} \right], \qquad (5-32)$$

kde znaménka mínus u členů s  $r_{42}$ ,  $r_{43}$ ,  $r_{62}$  a  $r_{63}$  jsou v důsledku předpokladu, že elektrodou 1 do země vtéká proud +*I* a elektrodou 4 vytéká opačný proud -*I*. Z Ohmova zákona lze pak pro jednotkový proud *I*, pokud nás zajímá samotná rezistivita půdy vyjádřit rezistivitu půdy jako

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{I} \cdot \frac{\rho I}{4\pi} \left[ \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{13}} - \frac{1}{r_{42}} + \frac{1}{r_{43}} + \frac{1}{r_{52}} - \frac{1}{r_{53}} - \frac{1}{r_{62}} + \frac{1}{r_{63}} \right]$$
(5-33)

Pak po dosazení velikostí vzdáleností r a vyjádření rezistivity

$$r_{12} = a; r_{13} = 2a; r_{43} = a; r_{42} = 2a; r_{52} = \sqrt{4b^2 + a^2}; r_{53} = \sqrt{4b^2 + 4a^2};$$
  
$$r_{63} = \sqrt{4b^2 + a^2}; r_{62} = \sqrt{4b^2 + 4a^2}$$
(5-34)

$$\rho = \frac{4\pi R}{\left[\frac{2}{a} - \frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right]} \tag{5-35}$$

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} = \frac{4\pi aR}{n}$$
(5-36)

kde hodnota *n* závisí na poměru hloubky zatlučení elektrod a délce rozestupu. Pro většinu praktických rozestupů se pak *n* blíží 2 a vztah přejde v jeho známější zjednodušené znění

$$\rho = 2\pi a R = 2\pi a \frac{U}{I} \tag{5-37}$$

Problémem výše uvedeného Wennerova měření je případ, kdy je provedeno na reálných komplexních složení půdy. Jak bylo poukázáno na Obr. 5-18, Obr. 5-19 a Obr. 5-20, tak homogenní složení půdy se příliš často nevyskytuje. Pokud je Wennerovo měření provedeno na složitějších modelech půdy, tak získaná hodnota rezistivity je jen jakousi zdánlivou rezistivitou vyjadřující průměrné vlastnosti měřené půdy přibližně do hloubky 2*a*. Průběh této měřené zdánlivé rezistivity se pak zpravidla mění se zvětšujícím se rozestupem elektrod *a*. Jelikož častějším případem je složení půdy z několika horizontálních vrstev (podle Obr. 5-23 (a) ) byly vytvořeny různé metody, které umožňují ze změřeného průběhu zdánlivých rezistivit stanovit parametry vícevrstvého modelu půdy.



Obr. 5-23 Horizontálně a vertikálně dělená půdy do vrstev, He [54]

Nejjednodušším případem je horizontální dvouvrstvý model půdy s rezistivitami povrchové a spodní vrstvy půdy  $\rho_1$  a  $\rho_2$  a hloubkou povrchové vrstvy  $h_1$ .

Odvození vztahu pro výpočet potenciálů od bodového proudového zdroje v tomto případě lze obdobně jako v případě Wennera provést na základě metody zrcadlení. V tomto případě je ovšem zapotřebí do výpočtu potenciálů zahrnout i zrcadlové obrazy ve spodní vrstvě a ve vzduchu, viz Obr. 5-24.

Pro stanovení potenciálu  $dV_j$  v bodě M se souřadnicemi  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  od bodového zdroje v bodě J se souřadnicemi  $x_j$ ,  $y_j$ ,  $z_j$  se zavedeným souřadným systémem xyz s počátkem v bodě O a osou z směřující dolů, tedy levotočivý souřadný systém podle Obr. 5-25 lze zapsat vztah [57]

$$dV_j = \frac{\rho_1 \cdot i_j \cdot du}{4\pi} \left[ \frac{1}{r_{oj}} + \frac{1}{r'_{oj}} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left( \frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r'_{nj-}} + \frac{1}{r_{nj+}} + \frac{1}{r'_{nj}} + \frac{1}{r'_{nj}} + \frac{1}{r'_{nj}} \right) \right]$$
(5-38)



*Obr. 5-24 Potenciál v bodě M od bodového zdroje v povrchové vrstvě, dvouvrstvý model půdy metoda zrcadlení, Dawalibi [57]* 

Kde vzdálenosti roj a rnj lze vyjádřit pomocí souřadnic bodů jako

$$r_{oj} = \sqrt{(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + (z_j - z_o)^2}$$
(5-39)

$$r'_{oj} = \sqrt{(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + (z_j + z_o)^2}$$
(5-40)

$$r_{nj+} = \sqrt{(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + [2nh + (z_j - z_o)]^2}$$
(5-41)

$$r'_{nj+} = \sqrt{(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + [2nh + (z_j + z_o)]^2}$$
(5-42)

$$r_{nj-} = \sqrt{(x_j - x_o)^2 + (y_j - x_o)^2 + [2nh - (z_j + z_o)]^2}$$
 (5-43)

$$r'_{nj-} = \sqrt{(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + [2nh - (z_j - z_o)]^2}$$
(5-44)

a kde K je zavedený koeficient odrazu

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \tag{5-45}$$

Proměnná *h* značí hloubku povrchové vrstvy, proměnná *n* je pořadový index sumy, *du* je délka proudového elementu a  $i_j$  (A/m) je lineární hustota proudu tekoucí z proudového zdroje do země. V tomto případě, kdy se jedná o bodový zdroj je součin  $i_j \cdot du$  roven celkovému proudu bodového zdroje *I*. Odvozený vztah je platný pouze pro případ, že proudový zdroj i bod M jsou oba umístěny v povrchové vrstvě půdy.



Obr. 5-25 Prostorové vyobrazení zdrojového bodu J a bodu M, Dawalibi [57]

Z odvozeného vztahu (5-38) je tak zřejmé, že v případě vícevrstvého modelu půdy bude potenciál od každého bodového proudového zdroje výsledkem součtu nekonečné sumy zrcadlových obrazů přes rozhraní dvou vrstev. Zjednodušený Wennerův vztah (5-37), resp. (5-32) tak bude v případě dvouvrstvého horizontálního modelu půdy tvořen lineární kombinací nekonečného počtu členů. Jelikož rezistivity obou vrstev mohou nabývat pouze hodnot od 0 (dokonale vodivá) až po nekonečno (dokonale nevodivá), tedy *K* nabývá hodnot od -1 do +1, lze dokázat, že vztah (5-38) je konvergentní. Nicméně explicitní analytické řešení, které by umožňovalo analyticky vyjádřit požadované proměnné  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  a *h* jako funkci zdánlivých rezistivit  $\rho$  závislých na rozestupu elektrod není úplně jednoduše možné (tj.  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $h = f(\rho(a))$ ).

Problémem přiřazení parametrů vícevrstvému modelu půdy se zabývalo mnoho výzkumníků. Odvozené metody lze dělit na empirické a analytické. Empirické metody jsou obvykle založeny na zkušenosti interpretování výsledků měřených  $\rho(a)$ . V případě dvouvrstvého modelů půdy lze pak uvažovat, že změřená rezistivita pro malé rozestupy odpovídá rezistivitě povrchové vrstvy půdy. Rezistivita pro velké rozestupy pak konverguje k rezistivitě spodní vrstvy půdy. Poněkud obtížnější je pak korektní interpretace hloubky povrchové vrstvy půdy. K empirickým metodám lze zmínit např. metody autorů Gishe a Rooneyho [80] a autora Lancaster-Jonse [81].

V případě analytických metod lze vysledovat dva přístupy. Prvním lze označit jako použití expertních křivek. Pro tuto metodu byly předem dopočteny tzv. Master Curves (expertní křivky) pro různé hodnoty koeficientu *K* a hloubky povrchové vrstvy *h* (Obr. 5-26). Parametry půdy lze pak stanovit při získání překryvu vynesených změřených rezistivit  $\rho(a)$  na průsvitku s Master Curves. Předpokladem je, že rezistivita povrchové vrstvy  $\rho_1$  se rovná změřené rezistivitě pro malé rozestupy elektrod.



Obr. 5-26 Horizontální dvouvrstvý model, Master Curves Dawalibi [94]



*Obr. 5-27 Hledání překryvu měřených*  $\rho(a)$  *s Masetr Curves, Dawalibi [94]* 

Obměněnou přirovnávací metody je pak grafická metoda podle Tagga [76]. Při této metodě jsou změřené hodnoty rezistivit přepočteny na různé koeficienty odrazu k pro všechny rozestupy tak, že vznikne série k-křivek (k = f(h/a) pro každý měřený rozestup a) a ty jsou vyneseny do jednoho grafu. Tak lze sestrojit závislosti k-křivek, které se v ideálním případě protnout v jednom průsečíku. Tato situace je znázorněna na Obr. 5-28. Křivky z tohoto obrázku byly sestrojeny pro

měření na ideálním horizontálním dvouvrstvém modelu půdy o parametrech  $\rho_1 = 500 \ \Omega m$ ,  $\rho_2 = 1000 \ \Omega m$ , h = 1 m. Samotné hodnoty změřených zdánlivých rezistivit jsou vyobrazeny v Obr. 5-29. Provedené měření na idealizovaném modelu půdy bylo simulováno v prostředí Ansoft Maxwell, kdy byl sestrojen odpovídající model půdy spolu s modelovaným čtyř-elektrodovým Wennerovým měřením, viz. *Obr. 5-30* a kapitola 5.2.1.



Obr. 5-28 Vykreslení k-křivek pro model půdy 500/1000/1m



*Obr. 5-29 Zdánlivé rezistivity změřené Wennerovou metodou pro různé rozestupy elektrod pro ideální dvouvrstvý horizontální model půdy* 



*Obr. 5-30 Model pro měření na dvouvrstvém modelu půdy v programu Ansoft Maxwell spolu s vykreslenou sítí konečných prvků [82]* 

Druhým přístupem v případě analytických metod je rigoróznější a lépe algorytmizovatelný postup založený na metodě hledání minima chybové funkce teoretického průběhu zdánlivých rezistivit a změřených [83]. V podstatě lze metodu přirovnat k optimalizační úloze. Ze vztahů (5-33) a (5-38) lze odvodit vztah pro zdánlivou rezistivitu půdy závislou na rozestupu elektrod, hloubce povrchové vrstvy a rezistivitě povrchové vrstvy  $\rho = f(\rho_1, a, h)$  jako

$$\rho = \rho_1 \left[ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right) \right]$$
(5-46)

Pak ze změřených zdánlivých rezistivit  $\rho_{m,o}$  a dopočtených teoretických rezistivit  $\rho_o$  podle (5-46) lze stanovit chybovou funkci jako

$$\psi(\rho_1, \rho_2, h) = \sum_{o=1}^{N} \left[ \frac{\rho_{m,o} - \rho_o}{\rho_{m,o}} \right]^2$$
(5-47)

kde N je celkový počet měřených rozestupů.

Zvolním počátečních hodnot  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  a *h* pak lze iteračním procesem metodou největšího spádu dohledat minimum této chybové funkce a nalézt tak odpovídající model měřené půdy. Na Obr. 5-31 je vyobrazen průběh funkce (5-46) pro různé hodnoty rozestupu *a* a hodnoty koeficientu odrazu *K* spolu s červeně vynesenými hodnotami změřených rezistivit z měření pro idealizovaný model podle Obr. 5-29 s parametry  $\rho_1 = 500 \ \Omega m$ ,  $\rho_2 = 1000 \ \Omega m$ , h = 1 m. Metodou největšího spádu spolu s metodou nejmenších čtverců jsou tak iteračně měněny hodnoty  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  a *h* až je dosaženo maximální shody mezi měřeným a teoretickým průběhem rezistivit. Na uvedeném obrázku pak např. hodnota chybové funkce v případě dobré shody nabývá  $\psi = 0.039$ , v případě nedobré shody pak  $\psi = 0.317$ . Pro názornost je průběh chybové funkce  $\psi$  vyobrazen na Obr. 5-32 spolu s vyznačením hodnot pro dobrou shodou. Jelikož pro vykreslení průběhu chybové funkce v závislosti na všech proměnných by byl zapotřebí prostor 4D, je v uvedených obrázcích vždy jeden parametr konstantní.



*Obr. 5-31 Průběh zdánlivé rezistivity v závislosti na nalezené hloubce a rezistivitách v porovnání se změřenými rezistivitami, a) dosaženo dobré shody, b) nedobrá shoda* 

Korektní vytvoření modelu půdy tvoří relativně stěžejní část při modelování zemničů. Vytvoření nekorektního modelu může vést ke značně odlišným výsledkům. V následujícím textu je poukázáno na možné zdroje chyb při modelování půdy. Nejprve je poukázáno na vliv nejednoznačné interpretace výsledků z měření a jejich vliv na modelování a následně jsou rozebrány další možné modely půdy.



*Obr.* 5-32 *Průběh chybové funkce*  $\psi$  *se zvýrazněnou dobrou shodou,*  $\rho_1 = 500 \ \Omega m$ 

#### 5.1.6.1 Modelování půdy na základě měření

Pro přiřazení parametrů dvouvrstvému modelu půdy byla v rámci diplomové práce pana Matysky [82] pod vedením autora této disertační práce implementována Taggova metoda [76] a bylo vytvořeno jednoduché GUI v prostředí Matlabu [84]. Přehled tohoto GUI je vyobrazen na Obr. 5-33, kde jsou načtené hodnoty z Wennerova měření na idealizovaném modelu podle Obr. 5-29. Do programu lze zadat jak změřené odpory, tak i přepočtené rezistivity spolu s měřenými rozestupy. Po volbě rezistivity povrchové vrstvy, manuálního nebo automatického nalezení průsečíku s odpovídající hloubkou povrchové vrstvy a koeficientu odrazu je možné stanovit i rezistivitu spodní vrstvy půdy.

Funkce Taggovy metody v tomto GUI byla následně ozkoušena jak na datech z měření na idealizovaném modelu provedeném v Ansysu (viz Obr. 5-30), tak i na datech z provedených experimentálním měření [82]. K funkci Taggovy metody je nezbytné zmínit, že její aplikace na reálných datech je v důsledku zahrnutí mnoha dalších nepřesností jen přibližná. V uvedené diplomové práci byla měřena mj. lokalita v blízkosti Hrušovan nad Jevišovkou. Průběh změřených rezistivit je vynesen na Obr. 5-34, kdy měření bylo provedeno dvěma přístroji – Omicron CPC 100 a PU 193. Po vložení změřených rezistivit z Omicronu do vytvořeného GUI vznikne série k-křivek které se neprotínají ideálně v jednom bodě, nýbrž vzniká více průsečíků. (pozn. poslední dvě hodnoty pro rozestupy 25 a 30 m z přístroje Omicron byly vyškrtnuty, neboť se nejspíše jedná o chybu měření). Ze vzniklých průsečíků vynesených k-křivek Obr. 5-35 lze vyčíst, že parametry půdy lze předpokládat s rezistivitou povrchové vrstvy půdy  $\rho_1 \sim 1500 \ \Omega m$ , určeno z měření pro krátké rozestupy. Tloušťku povrchové vrstvy půdy h a rezistivitu spodní vrstvy půdy  $\rho_2$  lze ovšem předpokládat v určitém rozmezí a to tedy h = 1 m a k ní odpovídající rezistivita  $\rho_2 = 265 \ \Omega m$  až tloušť ku h = 2 m a k ní odpovídající rezistivitu  $\rho_2 = 121 \ \Omega$ m. Tedy silnější vrstvě povrchové vrstvy půdy odpovídá méně vodivá vrstva spodní vrstvy půdy a naopak. Tomuto rozmezí rezistivit p2 pak odpovídá interval koeficientu odrazu K = -0.7 až -0.85. Tedy nepřesnost určení druhé vrstvy půdy může nabývat v řádech jednotek desetin koeficientu odrazu – zde ~ +-200 Ωm, a nepřesnost určení hloubky povrchové vrstvy – zde +- 1 m.


Obr. 5-33 GUI pro stanovení parametrů půdy podle Tagga, Matyska [82]



Obr. 5-34 Průběh změřené zdánlivé rezistivity – Hrušovany nad Jevišovkou



Obr. 5-35 Stanovení parametrů půdy – Hrušovany nad Jevišovkou

Při uvažování takovéto možné chyby nepřesnosti stanovení modelu půdy pak lze očekávat v určitých případech i relativně velkou chybu na vybrané stěžejní bezpečnostní parametry zemniče. Velikost této chyby je možné pozorovat z Tab. 5-7 kde jsou uvedeny výsledky z výpočtu jednoduchého kruhového zemniče s uprostřed umístěným tyčovým zemničem pro 6 různých obměn parametrů dvouvrstvého modelu půdy. Schematické znázornění tvaru zemniče spolu s vyneseným průběhem elektrického potenciálu na povrchu země je pak vyobrazeno pro jeden model půdy na Obr. 5-36. Z výsledků lze pak vypozorovat, že mnohem větší vliv má nepřesnost určení rezistivity povrchové vrstvy půdy, tj. poslední dva řádky, rozdíl cca 3-9 % na maximální dotykové napětí a cca 4 % na krokové napětí. V případě změn rezistivit spodní vrstvy půdy lze pak pozorovat na dotykové i krokové napětí vliv cca 2-4 %. Z výsledků je dále zřejmé, že situace je mnohem horší v případě modelu LoH (low on high, tedy vrstva s menší rezistivitou na vrstvě s vyšší rezistivitou) než v případě HoL (high on low, vrstva s vyšší rezistivitou nahoře). Z porovnání výsledků posledních 4 řádků pro tyto LoH modely půdy jsou patrné značně rozdíly mezi výsledným odporem uzemnění a nárůstem potenciálu zemniče EPR. Z inženýrského hlediska tento efekt povede ke dvěma stavům, kdy v jednom z nich dojde k předimenzování zemniče (např. při stanovení modelu 300/1700/1 kdy skutečný by byl 300/1300/2 by inženýr prováděl další úpravy zemniče, aby dosáhl stejných parametrů jako pro skutečný model ~ tj. snížení odporu o cca 14  $\Omega$ ) a v druhém ke značnému poddimenzování (pokud by skutečný model byl např. 300/1700/1, ale byl by přiřazen model 300/1300/2, situace povede k nabytí dojmu, že návrh zemniče je již dostatečný, ale ve skutečnosti budou parametry značně horší. (Pozn. poloměr jednoduchého kruhového zemniče byl 5 m, hloubka uložení 0.6 m, průměr vodiče zemniče 10 mm, proud zemničem 30 A,

*Max TV a SV je stanoven v okruhu 6.6 m od středu zemniče a Max TV 1m je TV v okruhu 1 m od středu zemniče, rozložení potenciálu bylo stanoveno podle analytického řešení podle 5.2.2)* 

Model půdy	$R(\Omega)$	EPR (V)	Max TV (V)	Max SV (V)	Max TV (V)
$ ho_1/ ho_2/h~(\Omega m/\Omega m/m)$			(% EPR)	(% EPR)	1 m (% EPR)
1500/300/1	43.2	1295	1006 (78 %)	307 (24 %)	826 (64 %)
1500/100/2	45.8	1374	1126 (82 %)	378 (27 %)	902 (66 %)
300/1700/1	47.4	1421	403 (28 %)	165 (12 %)	124 (9 %)
300/1300/2	33.4	1003	318 (32 %)	119 (12 %)	131 (13 %)
300/1500/1	44.2	1325	393 (30 %)	159 (12 %)	127 (10 %)
100/1500/2	18.4	553	116 (21 %)	45 (8 %)	37 (7 %)

Tab. 5-7 Vliv nepřesnosti určení parametrů dvouvrstvého modelu půdy, kruh s tyčí uprostřed





Je vhodné doplnit, že potenciály na povrchu země jsou přímo úměrné injektovanému proudu (v podstatě v souladu s (5-38), pro stejnosměrné buzení při zanedbání reaktanční složky). Pak tedy dvojnásobný injektovaný proud 60 A způsobí dvojnásobný nárůst potenciálu zemniče, stejně tak jako dvojnásobnou velikost potenciálů v okolí zemniče, jak je patrné z Obr. 5-36. Nicméně dvojnásobný proud má také vliv na velikost vyhodnocovaných krokových a dotykových napětí, neboť pakliže potenciály na povrchu země při dvojnásobném proudu jsou  $V_{xy60A} = 2V_{xy30A}$ , tak pak kroková (dotyková) napětí

$$U_{TV30A} = V_{xy30A,1} - V_{xy30A,2}$$

$$U_{TV60A} = V_{xy60A,1} - V_{xy60A,2} = 2(V_{xy30A,1} - V_{xy30A,2})$$
(5-48)

Tedy dotyková i kroková napětí jsou pro dvojnásobný proud dvojnásobná (obecně *k*-násobná), což může být proti intuici, že velikosti samotných rozdílů na průběhu rozložení potenciálu přetrvají stejné.

V neposlední řadě je nezbytné zmínit, že naznačený problém určení parametrů modelu půdy podle Tagga nelze také jednoznačně obejít použitím analytického řešení v souladu s (5-46) a (5-47) podle [83], neboť v případě minimalizace chybové funkce může optimalizační metoda skončit v lokálním minimu. Dále lze předpokládat, že skutečné složení půdy nebude přesně odpovídat teoretickému dvouvrstvému modelu a tedy například uvedená optimalizační metoda navrhne model který se nejvíce podobá změřeným bodům, nicméně ke shodě nemusí dojít v celém intervalu změřených rezistivit. Tento stav je částečně pozorovatelný z Obr. 5-37, kde lepší shody je dosaženo pro rezistivity s většími rozestupy na úkor měření s menšími rozestupy.



*Obr. 5-37 Průběh změřených rezistivit Hrušovany nad Jevišovkou spolu s teoretickým průběhem pro model 1500Ωm/200Ωm/1.5m* 

Dalším poměrně častým problémem je modelování půdy pro malé zemniče pouze jako homogenní. Tato praxe se jeví být poměrně častým přístupem, který je stále doporučován podnikovou normou energetiky PNE 33 3300-1:2017 [85] a to dokonce i pro měření a vyhodnocování zemničů VVN a ZVN. Při tomto postupu je výsledná rezistivita homogenního modelu půdy stanovena jako prostý průměr *N* rezistivit měřených pro různé rozestupy *a* podle následujícího vztahu

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{N} \rho_i(a)}{N}$$
 (5-49)

Tato problematika byla okrajově naznačena v uvedené diplomové práci pana Matysky [82], kde pro uvedené měření v Hrušovanech nad Jevišovkou byla z prvních 6 změřených rezistivit pro rozestupy do 3 m stanovena rezistivita homogenního modelu půdy rovna 926.66 Ωm. Ze

zjednodušené analýzy se jeví, že v případě modelu HoL tento přístup vede spíše k naddimenzovanému řešení v důsledku zvolení větší rezistivity. Nicméně chyba je v tomto případě relativně malá Tab. 5-8. Horší je situace v případě modelu LoH kdy zvolené zjednodušení vede na značně poddimenzovaný návrh zemniče Tab. 5-9. (výsledky jsou uvedeny pro zemnič modelovaný v práci Matysky s D = 5.5 m, h = 0.4 m, průměr tyčí 15 mm)

Tab. 5-8 Porovnání výsledku dvouvrstvého a homogenního modelu půdy HoL, měření Hrušovany nad Jevišovkou

$\rho_{a}(\Omega m)$	0.5 m	1512	0.5 m	1499
	1 m	941	1 m	1494
	1.5 m	941	1.5 m	1483
	2 m	767	2 m	1462
	2.5 m	747	2.5 m	1432
	3 m	650	3 m	1392
Dvouvrstvý model		1512 Ωm / 333 Ωm /		1512 Ωm / 300 Ωm /
		1.08 m		5 m
Homogenní model		927 Ωm		1460 Ωm
$R_{ m dvouvrstvý}\left(\Omega ight)$		87.2		124.7
$R_{ m homogeni}\left(\Omega ight)$		90.5		142.3
EPR (V) dvouvrstvý		2615.4		3742
EPR (V) homogenní		2718.8		4282
MaxTV 1m (V) dvouvrstvý		1498.4		1366
MaxTV 1m (V) homogenní		828.8		1306

Uvedená náhrada zjednodušeným homogenním modelem půdy tak samozřejmě umožňuje značné zjednodušení řešené úlohy, nicméně to je způsobeno na úkor zhoršení přesnosti získaného řešení.

$\rho_{\rm a}\left(\Omega{\rm m}\right)$	0.5 m	302	0.5 m	300			
	1 m	317	1 m	301			
	1.5 m	347	1.5 m	304			
	2 m	387	2 m	309			
	2.5 m	435	2.5 m	317			
	3 m	483	3 m	327			
Dvouvrstvý model		300 Ωm / 1500 Ωm /		300 Ωm / 1500 Ωm /			
		2 m		5 m			
Homogenní model		379 Ωm		310 Ωm			
$R_{ m dvouvrstvý}\left(\Omega ight)$		51.5		39.4			
$R_{ m homogeni}\left(\Omega ight)$		37.0		30.3			
EPR (V) dvouvrstvý		1544.3		1182			
EPR (V) homogenní		1111.6		909			
MaxTV 1m (V) dvouvrstvý		242.3		265			
MaxTV 1m (V) homogenni		339.1		277			
* rezistivity $\rho_a$ dopočteny teoreticky podle (5-46)							

Tab. 5-9 Porovnání výsledků dvouvrstvého a homogenního modelu půdy LoH

### 5.1.6.2 Vertikální/šikmý model půdy a jeho nevhodná náhrada

Dvouvrstvý horizontální model půdy je v literatuře považován za vcelku ucházející ve většině analyzovaných případů [34], [94]. Nicméně mohou se vyskytovat i případy, kdy existuje složení i jiné popsatelné vhodněji jinými typy modelů půdy. Různých modelů by se opět dala najít celá řada. Pro některé, jednodušší případy lze nalézt i jejich odpovídající analytické řešení [54], [56], [76], [94]. Pod vedením autora této práce byla na téma porovnání těchto i jiných modelů půdy zpracována diplomová práce panem Kuběnou [86]. Uvedená práce si kladla za cíl zmapovat jaké chyby se lze dopustit pokud jsou i jiné modely půdy modelovány jako horizontální dvouvrstvé. Konkrétně byly v práci analyzovány modely vertikální kolmý s dvěma vrstvami půdy (viz např. Obr. 5-23 b) jehož pohled z vrchu je vyobrazen na Obr. 5-38, vertikální model se šikmým dělením pod úhlem  $\varphi$ , jehož pohled z boku je vyobrazen na Obr. 5-39, jednovrstvý model s nehomogenitou Obr. 5-40 a částečně pak i horizontální třívrstvý model podle Obr. 5-41.



*Obr. 5-38 Model vertikálního modelu půdy s vyznačením rozmístění elektrod Wennerova měření (pohled shora), Kuběna [86]* 



Obr. 5-39 Vertikální model se šikmým dělením (pohled z boku), Kuběna [86]



*Obr. 5-40 Jednovrstvý model půdy s nehomogenitou, pohled z boku a) a z vrchu b), Kuběna* [86]



Obr. 5-41 Třívrstvý model půdy, pohled z boku, Kuběna [86]

V rámci provedených simulací pro dané modely půdy bylo vždy provedeno měření rezistivity pro různé rozmístění elektrod Wennerova čtyř-elektrodového měření a pro různé parametry těchto modelů půdy. V případě modelovaného umístění elektrod Wennerova měření byl měněn parametr umístění středu elektrod M[x,y] a to tak, že se posouval blíže a dále od uvedeného rozhraní vrstev půdy (pro vertikální, šikmý a model s nehomogenitou). Rozmístění elektrod bylo dále umísťováno na přímce s úhlem  $\alpha$  (Obr. 5-38) simulujícím měření pod různým úhlem na dané rozmezí vrstev půdy. U modelů půdy pak byly měněny jejich rezistivity  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ , hloubky vrstev  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  a dále pro šikmý model byl měněn úhel dělení rozhraní  $\varphi$  Obr. 5-39.

Ze změřených hodnot rezistivit pro různé rozestupy byly následně za pomocí vytvořeného GUI [82] stanoveny Taggovou metodou parametry dvouvrstvého modelu půdy. Následně bylo možné provést simulaci umístění modelu jednoduchého kruhového zemniče jak do náhradního dvouvrstvého horizontálního modelu půdy, tak i do skutečného jiného (vertikální, šikmý atd.) uvažovaného při Wennerově měření. Cílem tak bylo stanovit chybu nevhodného modelování i jiného modelu půdy jeho ekvivalentním dvouvrstvým horizontálním modelem.

Ze získaných výsledků se jeví, že modelování těchto jiných modelů půdy pomocí dvouvrstvého modelu půdy vede ve většině prozkoumaných případů k i více jak 25 % předimenzování návrhu (průměrně cca 5-25 %). Nicméně byly zjištěny i případy kdy takováto náhrada vedla k poddimenzování o přibližně až 20 % (náhradní dvouvrstvý model půdy vedl k řešení s menším zemním odporem než by byl v uvažovaném jiném modelu půdy, tedy nebezpečnější návrh). Jednalo se obvykle o extrémní hloubky uložení zemniče (3 m), které v případě kruhového zemniče nebudou z praktických důvodů příliš časté. Větší hloubky uložení zemniče jsou ovšem realizovány v případě zatlučených vertikálních tyčí, které mohou dosahovat i do hloubek 15 m aj. Dále v souvislosti se zjištěními o rozdílech mezi chováním HoL a LoH modelech půdy v předešlé kapitole 5.1.6.1 lze spatřovat jako dostatečně neprozkoumanou oblast případy, kdy výsledky Wennerova měření povedou na LoH model půdy. I přesto, že v uvedené práci nebyly tyto simulace provedeny dostatečně pro stanovení obecných závěrů, např. případ pro šikmý model půdy s umístěním zemniče do vodivější šikmé části s malým úhlem rozhraní  $\varphi$ , lze se domnívat, že právě pro tyto případy by se mohly vyskytovat častěji stavy vedoucí na poddimenzování návrhu zemniče obdobně jak při homogenní náhradě LoH modelů půdy.

### 5.1.6.3 Vliv náhodného zemniče na přiřazení modelu půdy

Jednou z chyb vyhodnocení rezistivity půdy může být přítomnost náhodného zemniče v půdě. Tento náhodný zemnič může představovat například nevykopaný starý zemnič, přítomnost železobetonové suti, jiné zakopané kovové předměty atp. Pro ilustraci chyby od takovéhoto zemniče byla provedena simulace Wennerova měření na dvouvrstvých modelech půdy HoL a LoH s umístěným náhodným zemničem. Náhodný zemnič byl tvořen mříží o rozměrech 10 x 10 m, s oky mříže 5 x 5 m. Náhodný zemnič byl umístěn do hloubky 0.8 m. Schéma náhodného zemniče spolu s průběhem potenciálu při provedení Wennerova měření je vyobrazené na Obr. 5-42. Z průběhu potenciálu na povrchu i v zemi je zřejmá jeho deformace v důsledku přítomnosti náhodného zemniče.



Obr. 5-42 Wennerovo měření s přítomností náhodného nefunkčního zemniče

Průběh zdánlivých rezistivit pro takovéto Wennerovo měření je vyobrazen na Obr. 5-43. V tomto obrázku je vyobrazen stav, kdy náhodný zemnič byl a nebyl v modelu půdy přítomen. Parametry půdy byly zvoleny jako  $\rho_1/\rho_2/h$  HoL 1000 Ωm/ 500 Ωm / 5 m a pro LoH 500 Ωm / 1000 Ωm / 5m. Z průběhů zdánlivých rezistivit je zřejmý vliv přítomnosti náhodného zemniče, který výrazně ovlivnil výsledky měření prakticky pro všechny rozestupy a až od rozestupů okolo 30 m se průběhy s a bez náhodného zemniče srovnávají. Je zapotřebí zmínit, že osa orientace Wennerova měření spolu s orientací náhodného zemniče v tomto případě leží v relativně extrémním případu a výsledný vliv na průběh rezistivit je tak extrémní. V případě, že měření bude v tomto případě provedeno jen do rozestupů cca 10 m se pak z výsledků může jevit, že v obou uvažovaných případech HoL a LoH (With) musí být výsledný model založený na výsledcích měření tvořen tenkou méně vodivou povrchovou vrstvou pod kterou je již vodivější spodní vrstva. Proto pro stanovení vlivu přítomnosti náhodného zemniče tak byla provedena série simulací kvantifikující vliv špatně určeného modelu půdy na výsledné parametry instalovaného zemniče. Postup simulací byl následující:

- Měření zdánlivých rezistivit je provedeno na daném dvouvrstvém modelu půdy za přítomnosti náhodného zemniče.
- Je uvažováno měření rezistivit jen do maximálního rozestupu 10 m. Tím vzniká předpoklad, že přítomnost náhodného zemniče v půdě není odhalena na základě změřených průběhů rezistivit půdy.
- Zdánlivým rezistivitám pro rozestupy do 10 m je přiřazen dvouvrstvý model půdy Taggovou metodou.
- 4) Pro přidělený model půdy je proveden návrh jednoduchého kruhového zemniče s křížem uprostřed takový, aby maximální dotykové napětí v geometrickém středu nepřekročilo dovolené dotykové napětí podle křivky dovolených napětí V<sub>tp</sub> [2]. Tak je získán průměr takovéhoto kruhového zemniče *D*. Jeho hloubka uložení je zvolena jako 0.5 m a průřez vodiče 10 mm.
- 5) Tento kruhový zemnič je uložen do přiděleného modelu půdy s i bez náhodného zemnič a jsou stanoveny předpokládané parametry zemniče odpor R, celkový nárůst potenciálu *EPR* a maximální dotykové napětí  $V_{t1}$  v jeho středu.
- 6) Navržený kruhový zemnič o průměru *D* je dále uložen do skutečného modelu půdy společně s náhodným zemničem a jsou stanoveny skutečné parametry jakých bude tento zemnič dosahovat.
- 7) Jsou provedeny i simulace umístění navrženého zemniče do předpokládaného modelu půdy spolu s náhodným zemničem (With) tj. stav, kdy by se na přítomnost náhodného zemniče v průběhu jeho instalace přišlo, ale nebyl by odstraněn jde spíše o informativní údaje, jakých hodnot by se dalo dosáhnout následným přepočítáním návrhu. A dále stav umístění navrženého zemniče do skutečného modelu půdy bez náhodného zemniče (Without) uvažující stav kdy by se náhodný zemnič v průběhu jeho instalace odstranil.



Obr. 5-43 Průběh zdánlivých rezistivit při měření přes náhodný zemnič

Průběh potenciálu při umístění navrženého i skutečného zemniče do modelu půdy je vyobrazen na Obr. 5-44. Z průběhu potenciálu je zřejmé jeho zakřivení od předpokládatelného průběhu kruhových ekvipotenciál.



Obr. 5-44 Průběh potenciálu v okolí zemniče při přítomnosti náhodného zemniče

Výsledky simulace jsou pak uvedeny v Tab. 5-10 až Tab. 5-13. Při přiřazování modelu půdy byly uvažovány scénáře, kdy je přiřazován dvouvrstvý model půdy nebo homogenní model půdy s průměrnou rezistivitou jak bylo popsáno dříve v 5.1.6.1. Pro stanovení dovoleného dotykového napětí  $V_{tp}$  byl uvažován scénář s přídavným odporem obuvi 1000  $\Omega$  a zemním odporem kontaktu chodidla se zemí jako 1.5 x  $\rho_s$ , kde  $\rho_s$  byla uvažovaná povrchová rezistivita půdy podle měřeného modelu půdy. Předpokládané chování zemniče je v tabulkách zvýrazněno zeleně, skutečné chování zemniče pak červeně, případně pak pokud by byl náhodný zemnič při instalaci odstraněn tak pak oranžově. Proud zemničem při poruše byl uvažován 30 A, který odpovídá dle ČSN 33 3070 [125] zbytkovému proudu pro smíšenou kompenzovanou síť 300 A.

Tab. 5-10 Skutečný model HoL 1000/500/5, nahrazen dvouvrstvým modelem 1012/117/1.2 s kruhem D = 18 m

Model půdy a přítomnost náhodného zemniče		$\rho_{\rm s}\left(\Omega{\rm m}\right)$	$V_{\mathrm{tp}}\left(\mathrm{V} ight)$	$R\left(\Omega ight)$	EPR (V)	$V_{t1}$ (V)
Skutečný 1000/500/5	With	1000	200	25,3	760	173
Skutečný 1000/500/5	Without – odstraněn	1000	200	25.7	770	147
Přidělený 1012/117/1.2	Without – návrh	1000	200	13.2	397	189

Tab. 5-11 Skutečný model HoL 1000/500/5, nahrazen jednovrstvým homogenním 530  $\Omega$ m, kruh D = 10 m

Model půdy a přítomnost náhodného zemniče		$\rho_{\rm s} \left( \Omega {\rm m} \right)$	$V_{\mathrm{tp}}\left(\mathrm{V} ight)$	$R\left(\Omega ight)$	EPR (V)	$V_{t1}$ (V)
Skutečný 1000/500/5	With	1000	200	43.9	1317	325
Skutečný 1000/500/5	Without – odstraněn	1000	200	45.9	1376	276
Přidělený 530 uniform	Without – návrh	530	160	28.2	846	143

Tab. 5-12 Skutečný model LoH 500/1000/5, nahrazen dvouvrstvým 500/180/5 s kruhem D = 12 m

Model půdy a přítomnost náhodného zemniče		$\rho_{\rm s}\left(\Omega{\rm m}\right)$	$V_{\mathrm{tp}}\left(\mathrm{V} ight)$	$R\left(\Omega ight)$	EPR(V)	$V_{t1}$ (V)
Skutečný 500/1000/5	With	500	160	27.3	818	121
Skutečný 500/1000/5	Without – odstraněn	500	160	27.5	825	99
Přidělený 500/180/5	Without – návrh	500	160	13.3	399	131

Tab. 5-13 Skutečný model Lo<br/>H 500/1000/5, nahrazen jednovrstvým homogenním 276  $\Omega$ m s kruhem D = 6 m

Model půdy a přítomnost náhodného zemniče		$\rho_{\rm s}(\Omega{\rm m})$	$V_{\mathrm{tp}}\left(\mathrm{V} ight)$	$R\left(\Omega ight)$	EPR (V)	$V_{t1}$ (V)
Skutečný 500/1000/5	With	500	160	41.2	1235	285
Skutečný 500/1000/5	Without – odstraněn	500	160	47.0	1411	232
Přidělený 276 uniform	Without – návrh	276	120	22.9	687	132

Z dosažených výsledků je pak přímo zřejmá nevhodná náhrada homogenním modelem půdy, která v obou řešených případech vedla na poddimenzovaný návrh. Vždy došlo k překročení dovoleného dotykového napětí takovéhoto zemniče. Celkové nárůsty potenciálu zemniče spolu s zemním odporem dosahovaly přibližně 1.5-2 násobku hodnot oproti předpokladu a vždy došlo k poddimenzování návrhu. V případě použití dvouvrstvého modelu půdy je situace o něco lepší, neboť vyhodnocované dotykové napětí  $V_{t1}$  zůstává menší jak navrhované dovolené dotykové

napětí, nicméně celkový nárůst potenciálu zemniče spolu s zemním odporem dosahují opět přibližně dvojnásobných hodnot oproti předpokládaným v návrhu a u těchto dvou parametrů došlo opět k poddimenzování. Tento stav je taktéž nežádoucí, neboť v případě zavlečení nulového potenciálu ze vzdálené země do oblasti zvýšeného potenciálu takovéhoto zemniče mohou vznikat mnohem nebezpečnější situace oproti uvažovaným v průběhu návrhu. Taktéž v případě propojení uzemňovacích systémů více takovýchto elektrických stanic, může být výsledný zemní odpor paralelní kombinace více zemničů mnohem vyšší než by se jevil z předpokládaných hodnot.

Je dobré ovšem zmínit, že zhotovené zemnící systémy prochází výchozí revizí, jejíž součástí je i měření jejího zemního odporu a tak uvedený problém by byl nejspíše odstraněn v průběhu uvádění zemnící soustavy do provozu, nicméně v některých případech tomu tak být nemusí, jak např. diskutováno v 6.6.2.

Pozn.: V případě skutečného modelu HoL s náhradou dvouvrstvým modelem 1012/117/1.2 podle Tab. 5-10 lze předpokládat spíše náhradu složitějším zemničem. Byly provedeny dva kruhy s průměry 6 a 14 m. Výsledky z této simulace viz Tab. 5-14. Situace je v tomto případě mírně lepší jak v případě jednoho kruhu.

Tab. 5-14 Skutečný model HoL 1000/500/5, nahrazen dvouvrstvým 1012/117/1.2 s dvěma kruhy D = 6 a 14 m

Model půdy a přítomnost náhodného zemniče		$\rho_{\rm s}\left(\Omega{\rm m}\right)$	$V_{\mathrm{tp}}\left(\mathrm{V} ight)$	$R\left(\Omega ight)$	EPR (V)	$V_{t1}$ (V)
Skutečný 1000/500/5	With	1000	200	30.9	926	150
Skutečný 1000/500/5	Without – odstraněn	1000	200	31.3	938	120
Přidělený 1012/117/1.2	Without – návrh	1000	200	14.9	447	184

#### 5.1.6.4 Shrnutí problematiky měření a modelování půdy

Z provedeného rozboru modelování a chování různých modelů půdy je zřejmé, že korektní modelování půdy má prakticky dominantní efekt na všechny sledované parametry zemničů. Jako obecně přijatý a nejčastěji používaný model půdy je používán a doporučován dvouvrstvý horizontální model [34], [35], [94]. I když autor této práce nedisponuje rozsáhlými vlastními zkušenostmi v oblasti měření rezistivit půdy, aby mohl toto tvrzení potvrdit nebo vyvrátit, tak i přesto se domnívá, že užití homogenní modelu kromě případů kdy se v místě instalace homogenní model skutečně vyskytuje, je takováto náhrada víceméně nevhodná. Samozřejmě zde záleží na spoustě faktorů jako poměr rezistivit – koeficient odrazu, tloušťka povrchové/více vrstev půdy, velikost zemniče, užití vertikálních tyčových zemničů atp. Z autorem nabytých zkušeností ze studia mnohých vědeckých publikací a dále z jednání mezinárodních pracovních skupin CIRED & Cigré B3.35 (z něž vznikla příručka [102]) a Cigré B3.54 jež obě spojují experty přes uzemňovací soustavy z celého světa se autor této práce domnívá, že užití dvouvrstvého modelu by mělo být dnes prakticky standardně přijatým modelem, který relativně obstojně modeluje i složitější složení půdy. Přesto se jeví, že nejen na národní úrovni [64], [70], [85], ale i na mezinárodní je toto stále především v oblasti menších VN zemničů běžnou praxí.

V rámci podpůrných simulací pak bylo poukázáno na možné zdroje chyb při určování dvouvrstvého modelu půdy stejně tak jako na možnou chybu v důsledku použití pouze jednovrstvého homogenního modelu půdy s průměrnou rezistivitou. Při uvážení uvedených zdrojů chyb lze předpokládat odchylku u sledovaných parametrů zemniče jako:

- Chyba určení parametrů půdy:  $\pm 0.2$  koeficientu odrazu *K* a  $\pm$  jednotky metrů pro hloubku povrchové vrstvy půdy.
- Chyba určení zemního odporu zemniče (platí pro menší zemniče) pře- i poddimenzování v řádech od 5 do cca 40 % (v hodně extrémních situacích i 100 % a více).
- Chyba v určení celkového nárůstu potenciálu zemniče EPR v důsledku přímé provázanosti EPR s zemním odporem zemniče skrze Ohmův zákon (při zanedbání reaktance) je vliv stejný, jak pro zemní odpor.
- Chyba určení dotykového napětí ve středu zemniče pře- i poddimenzování o cca 10-40 %. Z dosažených výsledků se jeví, že extrémních hodnot této chyby je dosahováno především při použití jednovrstvého homogenního modelu půdy. Naopak nevhodně zvolené parametry dvouvrstvého modelu půdy mají spíše menší vliv na výsledné dotykové napětí. Toto nepochybně souvisí s faktem uvedeným v (5-48), kde bylo ukázáno, že nárůst rozložení potenciálu v okolí zemniče vede k odpovídajícímu nárůstu také dotykových a krokových napětí. V popsaných situacích náhrady skutečného dvouvrstvého modelu půdy jednovrstvým tato náhrada vedla spíše k nárůstu zemního odporu, tím i EPR potažmo i celého rozložení potenciálu v okolí zemniče.

Je zde nezbytné zmínit, že tyto výsledky platí pro případ, že pro modelování zemniče byly použity pokročilejší metody modelování zemničů, neboť zjednodušené analytické vztahy obvykle tyto problémy nedokáží postihnout. Především pak dotyková napětí jsou v případě zjednodušených vztahů počítány pouze jako procentuální část celkového nárůstu potenciálu zemniče. Porovnání mezi zjednodušenými analytickými vztahy a pokročilejšími postupy je pak provedeno v 5.3.

V neposlední řadě je nezbytné zdůraznit, že nebyly otestovány všechny možné kombinace modelů půd a kombinací zemničů, které by mohly vést např. i k horším výsledkům. Z provedených simulací se pak jeví, že při řešení takovýchto neobvyklých situací je vhodné spíše než řešit konkrétní velikosti rezistivit jednotlivých vrstev daného modelu půdy, tak řešit celé spektrum jejich koeficientu odrazu *K* (tj. od -1 do 1) a následně vyhodnocovat odděleně stavy HoL a LoH, které vykazují mezi sebou odlišné charakteristiky chování. Samotná absolutní velikost koeficientu odrazu pak definuje míru závažnosti tohoto chování (tj. např. chybné použití HoL v simulacích častěji vede k mírnému předimenzování modelu, naopak chybná aplikace LoH modelu vede k mírnému poddimenzování). V případě LoH modelu je dále nezbytné zmínit, že u takovýchto modelů se zvýšený potenciál šíří do větší vzdálenosti od zemniče a bylo by vhodné detailněji řešit i kroková napětí, kdežto v případě HoL zemniče je profil potenciálu v okolí zemniče strmější a není zanášen do větší vzdálenosti od zemniče.

Zjednodušená analýza rozdílů mezi dvouvrstvými a jednovrstvým modelem půdy pak byla krom výsledků uvedených v této práci také autorem prezentována i na mezinárodní konferenci [87] pro 3 různé typy zemničů umístěné do HoL i LoH modely půdy.

## 5.2 Pokročilejší metody řešení uzemnění

Pokročilejšími metodami pro výpočet uzemnění jsou zde myšleny analytická a numerická řešení elektromagnetické úlohy v prostoru.

Rigorózních analytických řešení se vyskytuje v literatuře několik, např. [88], [90]. Obvykle se tato řešení liší v množství zjednodušení a byla v průběhu času postupně zdokonalována. Kupříkladu v [88] autor odvodil zjednodušené řešení plné elektromagnetické úlohy skrze skalární a vektorový potenciál pomocí momentové věty a modifikované metody zrcadlení. V této části bude

dále detailněji popsáno řešení pouze skalárního potenciálu skrze Laplaceovu rovnici provedené Dawalibim [57], [94], [95] spolu s použitím momentové věty pro stanovení proudového rozložení.

Numerické řešení elektromagnetické úlohy je dnes již implementováno v mnohých počítačových nástrojích usnadňujících inženýrskou a výzkumnou činnost v mnoha rozličných odvětvích. V samostatné podkapitole 5.2.1 tak je prezentováno řešení elektromagnetické úlohy pomocí metody konečných prvků implementované v programovém prostředí Ansoft Maxwell [73].

### 5.2.1 Ansoft Maxwell – Numerické řešení

S rozvojem výpočetní techniky v posledních přibližně dvou desetiletích se zpřístupnila i možnost numerických řešení jinak analyticky náročných úloh. Dostatek výpočetního výkonu spolu s velkým množstvím paměti umožňují provádět operace s velkými maticemi a to i při použití iteračních metod. Vzniklo tak mnoho programových implementací numerického řešení různých vědecko-inženýrských úloh včetně řešení úloh elektromagnetických. V případě řešení elektromagnetických úloh existuje několik různých konkurenčních nástrojů jako například Comsol Multiphysics [89] či Ansys Maxwell [73]. Jelikož Vysoké učení technické v Brně disponuje licencí na program Ansys Maxwell, který byl využit i pro získání některých výsledků v rámci této práce, tak se následující rozbor věnuje jen numerickému řešení skrze Ansys Maxwell.

Ansys Maxwell při řešení prostorové 3D (a i jednodušší plošné 2D) úlohy využívá metodu konečných prvků (FEM – finite element method). Při využití této metody je řešený model diskretizován na malé elementy – v případě Ansys Maxwell na čtyřstěny – a tak je vytvořena síť konečných prvků. V jednotlivých bodech (vrcholech aj.) těchto elementů je následně vypočteno rozložení požadovaného pole – potenciálního nebo i vektorového. Pro vypočtené rozložení pole je následně vypočtena globální hodnota chybové funkce. Tato chybová funkce je pro různé solvery různá. Například v případě solveru Magnetostatic tato funkce vyhází z teorie, že nemohou existovat magnetické monopoly tj.  $\nabla \cdot B = 0$ . Nicméně v případě libovolně vytvořené sítě konečných prvků tato rovnost není splněna a nabývá určité nenulové hodnoty  $\nabla \bullet B = err$ . Ovšem v průběhu dalšího iteračního zjemňování (zmenšování elementů) sítě pak v případě konvergence řešení velikost této chyby klesá až je řečeno, že získaná přesnost je dostatečná. Tak je získáno řešení pole v daných bodech sítě konečných prvků. Pakliže je vyžadován dopočet pole i mimo tyto body, je pole prokládáno kvadratickým polynomem druhého řádu. Standardně jsou v rámci řešení získány hodnoty magnetické intenzity H a skalárního potenciálu  $\varphi$ . Zbylé veličiny jako jsou proudová hustota J, tok magnetické indukce B či intenzita elektrického pole E jsou pak následně dopočítány stejně tak jak uživatelem další požadované veličiny. Při řešení elektromagnetické úlohy v daných bodech sítě konečných prvků jsou řešeny Maxwellovy rovnice v kvazi statickém tvaru.

Ansys Maxell nabízí celkem 6 solverů pro různě složité řešení požadované úlohy. Tyto se v zásadě dělí na 3 elektrické a 3 magnetické. Pro simulování zemničů byl zvolen elektrický solver DC conduction. Ten při svém řešení uvažuje pouze ustálený tok stejnosměrného proudu, všechny objekty jsou stacionární a v oblasti řešení se nevyskytují magnety ani elektromagnety. Při tomto řešení jsou zanedbány vektorové potenciály a je dosaženo řešení pouze potenciálové úlohy – tj. rozložení skalárního potenciálu  $\varphi$ . Tento solver počítá s nenulovými ohmickými ztrátami (úbytky napětí) v materiálech s nenulovou rezistivitou (v nedokonalých vodičích).

Popis tvorby modelů zemničů v tomto programu byl autorem popsán v mnoha článcích, nejvíce pak v [91], [92] a [93]. Zvolené modelování lze shrnout do následujících kroků:

- 1) Volba designu Maxwell 3D.
- 2) Volba solveru DC conduction.

- 3) Definování materiálů a limitů pro dokonalý vodič a izolant.
- 4) Tvorba modelu. Zde se osvědčil vestavěný grafický editor samotného programu Maxwell. Nicméně lze vkládat i 3D model vytvořený v jiném prostředí např. \*.dwg tj. v Cadu. V případě modelování zemničů byl vždy vytvořen 3D model zemniče, který byl následně umístěn do půlkulového modelu půdy o poloměru *R*. V případě, že byl modelován dvouvrstvý model půdy, byla polokoule dále rozdělena na oblasti o různých rezistivitách s tloušťkou kulové vrstvy odpovídající hloubce povrchové vrstvy půdy.
- 5) Definice okrajových podmínek a zdrojů. Při definování zdrojů byla obvykle vytažena jedna část zemniče nad povrch země a na ní byla definována plocha vtékání proudu *I* do zemniče. Jako plocha/y kam se proud stéká a vyskytuje se místo nulového potenciálu (Sink) byl zvolen vnější plášť polokoule. Situace je znázorněna na Obr. 5-45 červenou šipkou vyznačující proud a vzorkovaně podbarvenou plochou Sink. V případě dvouvrstvého modelu půdy byly zavedeny dvě plochy Sink pro povrchovou i spodní vrstvu půdy. Model zemniče a poloměr modelu půdy nejsou v tomto obrázku vyobrazeny v odpovídajícím měřítku. V případě, že nebyla vytažena žádná část zemniče nad zem, byly v geometrickém středu zemniče vytvořeny pomocné plochy, definující místo vstupu proudu a k ní protilehlá plocha insulating. Toto je vyobrazeno na Obr. 5-46, kde je mřížový zemnič v jehož středu jsou dva malé elementy. Jejich detail je pak vykreslený vpravo, kde jedna plocha (červeně) je pro vstup proudu *Current1* a druhá (fialově) jako *Insulating*.
- 6) Definování podmínek pro tvorbu sítě konečných prvků. Tj. maximální velikost elementů atp. Při modelování zemničů se relativně dobře osvědčil vestavěny *Mesher*, kdy podmínky tvorby sítě byly ponechány defaultní.
- Nastavení analýzy maximální počet iterací, maximální velikost chybové funkce Percent Error (Error energy, Delta Energy).
- 8) Provedení analýzy.
- 9) Získání požadovaných výsledků (nárůst potenciálu zemniče *V*, zemní odpor zemniče R = V/I, rozložení potenciálu v okolí zemniče aj.)

Výhodou programu Ansoft Maxwll je možnost skriptování celé analýzy, tj. celého procesu analýzy výše uvedených bodů 1-9. Pomocí skriptovacího jazyka Visual Basic Script tak bylo modelování zemničů prováděno i pro obměny různých parametrů (např. velikost poloměru okolní půdy, velikost rezistivit obou vrstev v případě dvouvrstvého modelu půdy, hloubka povrchové vrstvy půdy, různé rozměry zemniče atp.). Nevýhodou používání skriptování je pak riziko, že dosažená hodnota chybové funkce není dostatečně malá a výsledné vypočtené pole je tím zkreslené. Toto je částečně zobrazeno na Obr. 5-47, kde je vyobrazena část pole stejného mřížového zemniče jako v případě Obr. 5-46, ovšem s větší konečnou hodnotou errorové funkce. Jelikož se u tohoto mřížového zemniče jedná od středu tohoto zemniče po jeho okraje o přibližně elipsoidně symetrickou úlohu, mělo by pole být v obou tmavě modře vyznačených oblastech stejné. Z průběhu ekvipotenciálních kontur je ovšem zřejmý rozdíl mezi těmito dvěma oblastmi. Z obrázku je dále patrný nehladký průběh ekvipotenciál taktéž způsobený nedokonalou mříží konečných prvků. *(pozn. průběhy na Obr. 5-46 a Obr. 5-47 jsou pro jiné velikosti proudu)*. Příklad sítě konečných prvků byl vyobrazen dříve při modelování Wennerova měření na *Obr. 5-30*, kde je síť vykreslena jen na povrchu půdy.



*Obr. 5-45 Model zemnícího systému, prostorový pohled (a), pohled shora (b), pohled z boku (c)* 



Obr. 5-46 Vstup proudu u zemniče bez vyvedení zemniče nad povrch země



Obr. 5-47 Průběh potenciálu na povrchu země a vliv nastavení chybové funkce na výsledné vypočtené pole

Jedním z problémů, který by vyžadoval hlubší analýzu je problém modelování jen v DC oblasti. Jak bylo uvedeno, tak při modelování zemničů byl vybrán solver DC conduction. Z hlediska výběru nabízených solveru by byl vhodnější elektromagnetický Eddy Currents. Problémem tohoto solveru je možnost definovat pouze proudové zdroje a ty pouze na rovinné plochy. To znamená, že nelze úlohu definovat napětím a dále, že nelze využít polokoule jako model okolní země v důsledku jejich nerovinné podstaty. Z hlediska modelování toto pak znamená, že půda může být modelována pouze kvádrem. Jelikož při řešení Eddy current úlohy musí být předem známé přesné rozložení proudu, nelze v tomto případě využít okrajové podmínky Sink, která by se přiřadila všem 4 stěnám a spodní stěně a skutečné rozložení proudu by bylo dopočítáno programem. Tento solver totiž dále vyžaduje, aby přesné rozložení proudu bylo známo předem a tedy celkový proud co do zemniče vtéká je zapotřebí nějakým způsobem úměrně rozdělit mezi uvedených 5 stěn modelu půdy. Tato úloha může být značně problematická pro případ dvouvrstvého modelu půdy, který bude mít jednoznačně vliv na rozdělení toku proudu v zemi. Situace je vyobrazena v porovnání s půlkulovým modelem na Obr. 5-48.



Obr. 5-48 Model země pro Eddy Currents (a) a DC conduction (b)

Dalším problémem použití Eddy Currents solveru je složitost a rozsáhlost sítě konečných prvků. Při užití solveru DC conduction se prokázal jako dostatečný vestavěný Adaptivní mesher, který byl ve většině případů schopný úspěšně vytvořit a zjemnit síť konečných prvků tak, že bylo dosaženo řešení. A to i bez uživatelského bližšího specifikování parametrů tvořené sítě. V případě solveru Eddy Currents se ovšem jeví, že samostatný defaultně nastavený Adaptivní mesher je nedostatečný a je nezbytné důkladnější zmapování potřebných změn v jeho počátečním nastavení, stejně tak jako případné změny v samotném modelu.

Další problematickou oblastí použití Ansys Maxwell pro stanovení parametrů zemničů je volba velikosti poloměru modelu půdy spolu s velikostí nastavené chybové funkce. Zjednodušená analýza těchto parametrů byla autorem prezentována v [91] a jsou z ní zde vyobrazeny získané závislosti na Obr. 5-49. Při této analýze byl modelován jednoduchý kruhový zemnič s průměrem D = 6.5 m uložený v hloubce 0.8 m a v půdě o rezistivitě 50  $\Omega$ m (stejný jak na Obr. 5-48 b). Pro daný model půdy o poloměru R pak byla v rámci iteračního zjemňování sítě konečných prvků postupně snižována velikost chybové funkce (Percent error) jako 1 %, 0.7 %, 0.5 % a 0.3 %. Tato simulace byla provedena opakovaně pro různě veliké poloměry okolní půdy od velikosti 30 až po 300 m. Z výsledků je zřejmé, že oba parametry měly na výslednou hodnotu odporu vliv. Pro referenci je pak do grafu vynesena i velikost zemního odporu zemniče stanovená analyticky podle zjednodušeného Osolsoběho vztahu pro kruhový zemnič uložený v hloubce podle Tab. 5-3 jako Rosolosbě. Z uvedených výsledků se lze alespoň částečně domnívat, že hodnota získaná z programu Ansys Maxwell musí konvergovat k nějaké limitní hodnotě. Více k tomuto srovnání je dále uvedeno v kapitole 5.3. Pro ilustraci autorem simulovaných zemničů jsou mimo již prezentovaných Obr. 5-8, Obr. 5-14, Obr. 5-15 dále vyobrazeny: zemnič ze 3 kruhů a základového zemniče sloupové trafostanice Obr. 5-50 a model základového zemniče Obr. 5-51.



Obr. 5-49 Závislost nastavení analýzy zemniče v programu Ansoft Maxwell (fem) na výslednou hodnotu zemního odporu, pro kruhový zemnič D = 6.5 m, h = 0.8 m,  $\rho = 50 \Omega m$ , R poloměr modelu půdy, Rosolsobě hodnota stanovená zjednodušeným vztahem pro kruhový zemnič podle Osolsobě



Obr. 5-50 Zemnící soustava, např. sloupová trafostanice, armovaný betonový stožár a základový zemnič v kombinaci se třemi kruhovými zemniči



Obr. 5-51 Armovaný beton, základový zemnič, vliv počtu tyčí a rezistivity betonu

## 5.2.2 Dawalibi – zjednodušené analytické řešení

Farid Paul Dawalibi v sérii publikací [57], [94], [95] provedl odvození zjednodušeného řešení potenciálové úlohy pomocí Laplaceovy rovnice a pomocí momentové věty (autorem označované jako metody segmentace-integrace "segmentation-integration method"). Při odvození rozložení proudů zemničem dále vycházel z předpokladu konstantního potenciálu na vodičích zemniče, tedy předpokladu, že vodiče zemniče jsou ideálními vodiči. Tento předpoklad samozřejmě není pravdivý, neboť při průchodu proudu samotným zemničem na něm vznikají ohmické úbytky

93

napětí, které ale lze obvykle zanedbat, viz např. Obr. 5-52 kde je vyobrazen průběh potenciálu na vodiči zemniče vyobrazeného na Obr. 5-46 potažmo Obr. 5-47 (průběh potenciálu na středovém vodiči podél kratší osy zemniče, změna napětí dV ~ v jednotkách mV). Dalším původně zavedeným zjednodušením bylo zanedbání vlivu vektorového potenciálu a tedy všech efektů způsobených střídavými elektrickými poli. Rešení tohoto nedostatku publikoval později spolu s jugoslávským výzkumníkem Leonidem Grcevem [57], kde řešení doplnil o korektní řešení rozložení elektrického proudu v zemniči respektujícím střídavá elektrická pole. Tato úloha při jejím výpočtu vede na řešení komplexních Sommerfeldových integrálů, na což upozorňuje i [88] a kde k zjednodušenému řešení dospěli výzkumníci pomocí modifikované metody zrcadlení. Při řešení Sommerfeldových integrálů v uvedeném článku Dawalibi vyšel z disertační práce Leonida Grceva [97]. Dawalibi v průběhu několika desetiletí po prvním publikování svého řešení toto postupně vylepšoval, provedl mnoho studií a verifikací s reálnými měřeními. Dawalibi své řešení převedl do počítačového kódu nazvaného MALT, MALZ, RESAP atp. a později vydal jako komerčně dostupné řešení jako celek – počítačový program CDEGS [34] distribuovaný pod ním založenou kanadskou společnosti Safe Engineering Services & Technologies (SES & Technologies Ltd.). Tento software je i dnes komerčně dostupný, nicméně nakolik je shodné současné implementované výpočetní jádro programu s Dawalibim dříve publikovanými články se lze jen domnívat, neboť podobně, jako u ostatního dnes komerčně dostupného softwaru, samotné výpočetní jádro je z důvodu ochrany know-how víceméně utajeno.



Obr. 5-52 Průběh potenciálu na vodiči zemniči, Ansoft Maxwell

V následujícím textu je pro názornost a pochopení určitých závislostí zjednodušeně přeformulováno řešení Dawalibim podle [57], [94], [95]. Zjednodušené řešení potenciálové úlohy metodou zrcadlení pro dvouvrstvý model půdy bylo ukázáno v kapitole 5.1.6. Obdobného řešení lze dosáhnout řešením potenciálové úlohy pomocí Laplaceovy rovnice v případě, že bodový zdroj proudu O je umístěn do hloubky *e* pod povrch země (Obr. 5-53). Pro potenciál  $U_M$  od tohoto zdroje v bodě M musí být splněna Laplaceova rovnice ve válcových souřadnicích - v důsledku využití válcové symetrie podle následujícího vztahu

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \qquad (5-50)$$

Jejího řešení lze dosáhnou skrze řešení parciální diferenciální rovnice druhého řádu a jedné Besselovy rovnice. Při řešení musí být dále splněny okrajové podmínky

- 1) Potenciály v hloubce h na rozhraní obou vrstev se musí rovnat.
- 2) Normálová složka proudu v hloubce *h* na rozhraní vrstev musí být hladkou funkcí (tj. musí se rovnat v obou vrstvách).
- 3) Povrchovou vrstvou neteče proudu do vzduchu, tok proudu v hloubce 0 m je nulový.
- 4) Potenciál v nekonečnu se blíží nule.

Pro výpočet potenciálu  $U_{\rm M}$  v bodě M pro různé případy prostorového uspořádání zdroje a počítaného bodu lze pak získat vztahy:

a) Bodový proudový zdroj umístěn v povrchové vrstvé (e < h), bod M v povrchové  $U_{11}$  a v spodní  $U_{12}$  vrstvě

$$U_{11}(r) = \frac{i\rho_1}{4\pi} \left[ \psi(0) + \psi(e) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n [\psi(nh) + \psi(nh+e) + \psi(-nh) + \psi(-nh+e)] \right]$$
(5-51)

$$U_{12}(r) = \frac{i\rho_1(1+K)}{4\pi} \left[ \psi(0) + \psi(e) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n [\psi(nh) + \psi(nh+e)] \right]$$
(5-52)

b) Bodový proudový zdroj umístěn ve spodní vrstvě (e > h), bod M v povrchové  $U_{21}$  a ve spodní  $U_{22}$  vrstvě

$$U_{21}(r) = \frac{i\rho_2}{4\pi} \left[ \psi(0) + \psi(e) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n [\psi(-nh) + \psi(nh+e) - \psi(h(1-n)) - \psi(h(n-1)+e)] \right]$$
(5-53)

$$U_{22}(r) = \frac{i\rho_2}{4\pi} \left[ \psi(0) + \psi(e) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n [\psi(nh+e) - \psi(h(n-2)+e)] \right]$$
(5-54)

kde *K* je zavedený koeficient odrazu podle (5-45) a funkce  $\psi(a)$ 

$$\psi(a) = \frac{1}{\sqrt{r^2 + (2a+b)^2}} \tag{5-55}$$

Veličina *r* je velikost polohového vektoru mezi bodem O a M, při umístění počátku souřadného systému do bodu O (tj. vzdálenost mezi oběma body), proměnná *b* je hloubková vzdálenost mezi bodem O a M viz Obr. 5-53 a *a* je zavedená proměnná funkce  $\psi$ .



Obr. 5-53 Bodový zdroj proudu umístěný v dvouvrstvém modelu půdy s vyznačením rozměrových veličin, Dawalibi [94]

Vztahy (5-51) až (5-54) jsou odvozeny pro případ bodového zdroje. V případě podélných (tyčových) proudových zdrojů lze vyjít z předpokladu, že tyčový zemnič se skládá z nekonečného počtu bodových proudových zdrojů. Potenciál  $U_{\rm M}$  v bodě M pak bude superpozicí všech dílčích potenciálů  $dU_{\rm j}$  přes celou délku tyče du

$$U_M = \int dU_j \, du \tag{5-56}$$

Problémem rigorózního analytického řešení je v tomto případě neznámé rozložení proudů *i* ve vztazích (5-51) až (5-54), neboť v případě podélného segmentu jsou tyto také funkcí polohy na tyčovém segmentu i = f(u), viz souřadný systém uvw umístěný na tyčovém zemniči (proudovém zdroji), Obr. 5-54.



*Obr. 5-54 Tyčový zemnič s nekonečným množstvím proudových zdrojů po svojí délce, Dawalibi [94]* 

Tento problém Dawalibi navrhl vyřešit několika různými způsoby [57], [95]. Analyticky nejpřesnější se jeví být navrhovaná metoda "segmentation-integration", kdy hodnota potenciálu  $U_{\rm M}$  v bodě M od tyčového proudového zdroje je stanovena jako suma potenciálů od *m* dílčích segmentů



Obr. 5-55 Znázornění segmentace tyčového zemniče, Dawalibi [94]

Dílčí potenciály  $U_j$  od jednotlivých segmentů skládajících se z nekonečného množství bodových proudových zdrojů jsou pak stanoveny integrálem přes všechny tyto zdroje podél těchto segmentů *j*. Tedy např. pro dílčí potenciál  $U_j$  od segmentu j v povrchové vrstvě půdy podle (5-51) a délky  $l_j$  bude

$$U_j = \int_0^{l_j} U_{11}(u) du \tag{5-58}$$

kde  $U_{11}(u)$  je upravená funkce (5-51) tak, že při umístění souřadného systému uvw s osou u ležící na podélné ose segmetnu j a s jeho počátkem O' totožným s jedním krajovým bodem segmentu lze pro vzdálenosti *r* a *b* vztahu pro  $\psi$  podle (5-55) zapsat

$$r^{2} = (u - u_{0})^{2} + (v - v_{0})^{2} + (w - w_{0})^{2}; b = w_{0}$$
(5-59)

A pak  $\psi$  přejde v

$$\psi(a) = \frac{1}{\sqrt{(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2 + (w-w_0)^2 + (2a+w_0)^2}}$$
(5-60)

Dále při zavedení lineární proudové hustoty segmentu určující množství proudu vytékající podél délky nekonečně tenkého proudového segmentu  $\delta_i$  jako

$$\delta_j = \frac{I_j}{l_j} \qquad (A/m) \tag{5-61}$$

lze pak řešení výpočtu potenciálu (5-57) zobecněně zapsat jako

$$U_M = \sum_{j=1}^m U_j = \sum_{j=1}^m \delta_j \cdot A \cdot \left[ \Upsilon \int_0^{l_j} \psi(a) du \right]$$
(5-62)

kde

- $\psi(a)$  je funkce podle ( 5-60 ).
- Y zde zavedený symbol značící konvenci, že se jedná o odpovídající sumu funkcí  $\psi(a)$  pro potenciál  $U_{11}$  až  $U_{22}$  podle vztahů (5-51) až (5-54).
- *A* je zavedená konstanta v souladu se vztahy (5-51) až (5-54), (např. pro (5-51) jako  $A = \rho_1/4\pi$ )

Při znalosti lineárních proudových hustot jednotlivých segmentů  $\delta_j$  je pak z posledního uvedeného vztahu (5-62) možné stanovit hodnotu potenciálu kdekoli v okolí lineárního proudového zdroje (zemnicí elektrody).

V souladu se zavedenou konvencí souřadného systému uvw podle Obr. 5-55 pak lineární segment mění rozměry jen podél osy u a tedy ve vztahu (5-60) veličiny v = w = 0, body  $u_0$ ,  $v_0$ ,  $w_0$  odpovídají souřadnicím bodu M v souřadném systému uvw. Hloubkové rozměry  $w_0$ , h a e do (5-62) jsou dosazovány jako kladné hodnoty v souladu se zavedenými levotočivými souřadnými systémy xyz i uvw. Integraci funkce  $\psi$  v (5-62) lze provést jednoduchou substitucí a její řešení vede na výsledek v přirozeném logaritmu jako

$$\int_{0}^{l_{j}} \psi(a) du = \int_{0}^{l_{j}} \frac{du}{\sqrt{(u - u_{0})^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (2a + w_{0})^{2}}} = = \ln \frac{l_{j} - u_{0} + \sqrt{(l_{j} - u_{0})^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (2a + w_{0})^{2}}}{-u_{0} + \sqrt{u_{0}^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (2a + w_{0})^{2}}}$$
(5-63)

Tak tedy například pro samostatný lineární zdroj proudu v povrchové vrstvě půdy rozdělený jen na jeden segment délky  $l_j$  injektující celkový proud  $I_j$  do země lze potenciál na povrchu země  $dU_j$  vypočíst podle (5-62), potažmo (5-52) jako

$$dU_{j} = \frac{\rho_{1} \cdot \delta_{j}}{4\pi} \cdot \left[ dU_{1} + dU_{2} + \sum_{n=1}^{\infty} K^{n} (dU_{3} + dU_{4} + dU_{5} + dU_{6}) \right], kde:$$

$$dU_{1} = \ln \frac{l_{j} - u_{0} + \sqrt{(l_{j} - u_{0})^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + w_{0}^{2}}}{-u_{0} + \sqrt{u_{0}^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + w_{0}^{2} + w_{0}^{2}}}$$

$$dU_{2} = \ln \frac{l_{j} - u_{0} + \sqrt{(l_{j} - u_{0})^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (2e + w_{0})^{2}}}{-u_{0} + \sqrt{u_{0}^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (2w + w_{0})^{2}}}$$

$$dU_{3}(n) = \ln \frac{l_{j} - u_{0} + \sqrt{(l_{j} - u_{0})^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (2nh + w_{0})^{2}}}{-u_{0} + \sqrt{u_{0}^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (2nh + w_{0})^{2}}}$$

$$dU_{4}(n) = \ln \frac{l_{j} - u_{0} + \sqrt{(l_{j} - u_{0})^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (2nh + 2e + w_{0})^{2}}}{-u_{0} + \sqrt{u_{0}^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (-2nh + w_{0})^{2}}}$$

$$dU_{5}(n) = \ln \frac{l_{j} - u_{0} + \sqrt{(l_{j} - u_{0})^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (-2nh + w_{0})^{2}}}{-u_{0} + \sqrt{u_{0}^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (-2nh + w_{0})^{2}}}$$

$$dU_{6}(n) = \ln \frac{l_{j} - u_{0} + \sqrt{(l_{j} - u_{0})^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (-2nh + 2e + w_{0})^{2}}}{-u_{0} + \sqrt{u_{0}^{2} + v_{0}^{2} + w_{0}^{2} + (-2nh + 2e + w_{0})^{2}}}$$

Pro horizontálně umístěný segment délky  $u_p$  s počátečním bodem v bodě uvw = (0,0,0) a koncovým bodem (0,0, $u_p$ ) lze mezi proměnnými systému uvw a xyz zapsat podle Obr. 5-56

$$u_p = (x_p - x_s) \cos \alpha + (y_p - y_s) \sin \alpha \qquad (5-65)$$

$$u_0 = (x_0 - x_s) \cos \alpha + (y_0 - y_s) \sin \alpha$$
 (5-66)

$$v_0 = (y_0 - y_s) \cos \alpha - (x_0 - x_s) \sin \alpha$$
 (5-67)

$$w_0 = z_0 - z_s \tag{5-68}$$

Pro segment jiný, jak horizontální, je zapotřebí přepočíst souřadnice jinak [57].

Ve výsledném vztahu (5-62) bylo zatím předpokládáno, že lineární proudové hustoty  $\delta_j$  jsou známé. Jako zjednodušený přístup lze uvažovat, že lineární proudová hustota bude v každém segmentu stejná a tedy pro tyčový zemnič celkové délky *L* rozdělený na *m* segmentů injektující proud *I* bude

$$\delta_j = \frac{I}{L}$$
 (j = 1 ... m) (5-69)



Obr. 5-56 Horizontálně umístěný proudový segment, pohled shora, Dawalibi [57]

Tento předpoklad je platný pouze pro několik symetrických uspořádání zemniče (např. kruh) a v jiných případech může vést ke značným chybám. Získání této lineární proudové hustoty je možné při zavedení předpokladu, že potenciál na zemniči V (tj. nárůst potenciálu zemniče) je všude stejný. Pak pro nárůst potenciálu zemniče pro libovolný bod N na povrchu zemniče od všech segmentů *m* lze zapsat z (5-57)

$$V = \sum_{j=1}^{m} U_j(N)$$
 (5-70)

kde při vytknutí lineární proudové hustoty  $\delta_j$  z dílčích potenciálů (5-62) od segmentů a úpravě lze vztah upravit na

$$\sum_{j=1}^{m} \frac{\delta_j}{V} R_j(N) = \sum_{j=1}^{m} \lambda_j R_j(N) = 1$$
 (5-71)

kde  $R_j(N)$  vyjadřuje přibližně "něco jako vzájemnou rezistanci" mezi jednotlivými segmenty zemniče vyjádřenou v  $\Omega$ m a proměnná  $\lambda_j$  je zavedená normalizovaná proudová hustota.

Poslední uvedený vztah (5-71) musí platit pro všech *n* bodů N na povrchu zemniče. Při zavedení zjednodušení, že podmínka bude splněna jen pro n = m bodů zemniče, tedy počet ověřovaných bodů se rovná počtu segmentů, lze pak vztah maticově přepsat jako

$$\begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & \dots & R_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$
(5-72)

Po vyjádření proměnné  $[\lambda]$  z maticové rovnice

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & \cdots & R_{nm} \end{bmatrix}^{-1}$$
(5-73)

pak lze ze závislosti mez celkovým proudem, lineární proudovou hustotou a délkami elementů získat celkový nárůst potenciálu zemniče jako

$$I_j = \delta_j l_j \tag{5-74}$$

$$I = \sum_{j=1}^{m} I_j = \sum_{j=1}^{m} \delta_j l_j = V \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} l_1 & \cdots & l_m \end{bmatrix}$$
(5-75)

$$=\frac{l}{\begin{bmatrix}\lambda_1\\\vdots\\\lambda_m\end{bmatrix}}[l_1 \ \cdots \ l_m]}$$
(5-76)

Při znalosti celkového nárůstu potenciálu zemniče je pak možné stanovit i zemní odpor zemniče jednoduše jako

$$R = \frac{V}{I} \tag{5-77}$$

A dále také lineární proudovou hustotu v jednotlivých segmentech ze zavedené závislosti mezi  $\delta_j$  a  $\lambda_j$  podle (5-71) jako

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_m \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix}$$
(5-78)

Pak je již možné stanovit potenciály kdekoli v okolí zemniče podle (5-62). Je nezbytné zmínit, že (5-57) platí pro všechny segmenty zemniče. Do výpočtu tak lze zahrnout kombinaci pospojovaných základních typů zemnících elektrod (tyč, pásek, kruh atp.) tvořících jeden zemnič kterým do země teče celkový proud *I*. Celkový postup analytického výpočtu pak lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Zvolení levotočivého souřadného systému xyz s osou směřující do země.
- 2) Rozdělení všech elektrod zemniče na malé segmenty.

V

- 3) Stanovení vzájemných rezistancí  $R_{jk}$  podle (5-72) pro všech *m* segmentů a vybraných bodů *m* (jako vybrané body lze doporučit středové body každého segmentu, jak bylo uvažováno také v zde reprodukovaném odvození). Po sestrojení matice vzájemných rezistancí *m* x *m* lze stanovit normalizovanou proudovou hustotu  $[\lambda_j]$  z (5-73). Pro stanovení dílčích potenciálů  $U_j$  od segmentů se použije (5-62).
- 4) Ze znalosti normalizované proudové hustoty  $[\lambda]$  je stanoven nárůst potenciálu zemniče V.
- 5) Ze znalosti nárůstu potenciálu zemniče V je stanoven zemní odpor zemniče.
- 6) Ze znalosti nárůstu potenciálu zemniče V jsou stanoveny lineární proudové hustoty δ<sub>j</sub>. Následně je možné stanovit průběh potenciálu v požadovaných lokalitách v okolí zemniče. Z průběhu potenciálů je možné stanovit kroková a dotyková napětí.

Z důvodu zdlouhavého a procesně náročného postupu získávání výsledků parametrů zemničů, a dalších viz. 5.3, z programu Ansoft Maxwell byl autorem této práce sestrojen Dawalibiho analytický model výpočtu zemničů v prostřední Matlabu [84]. Postup podle výše uvedených bodů 1 až 6 a vztahů (5-62) a řešení v souladu s (5-76) tak byl rozdělen do série funkcí nazvaných souhrnně GEM\_soft: jednotlivě GEM\_Discretion.m, GEM\_Matrix.m, GEM\_Integration.m a GEM\_Vcalc.m. Pro zrychlení výpočtů pak bylo numericky intenzivní výpočetní jádro dále GEM\_Vcalc a GEM\_Integration převedeno na jim odpovídající funkce v programovacím jazyce C, čímž oproti implementaci v interpretovaném programovacím jazyce v Matlabu bylo dosaženo přibližně 6-7 násobného zrychlení. Řešení touto Dawalibiho metodou dosahuje oproti Ansoft Maxwell zrychlení přibližně 6-20x (např. 20min vs 60 s), nicméně v případě Dawalibiho řešení je potřebný čas silně odvislý od počtu požadovaných spočtených potenciálů. Jednoznačnou výhodou

je pak samotný výpočet nárůstu potenciálu zemniče, který dosahuje ještě mnohem vyššího zrychlujícího faktoru. Zdlouhavým je především proces výpočtu potenciálů v okolí zemniče, kdy při jemné diskretizaci tyto vznikají superpozicí mnoha elementů. V případě stanovení pouze celkového EPR je zapotřebí provést pouze inverzi matice řádu *N* odpovídající počtu segmentů zemniče.

Pro verifikaci autorem rekonstruovaného Dawalibiho analytického řešení byly provedeny simulace na stejných zemničích jako prezentoval sám Dawalibi [100], [101]. Jako příklad je zde vyobrazeno porovnání průběhu potenciálu přes střed jednoduchého čtvercového zemniče [101] podle Dawalibiho. Pro porovnání byly Dawalibim prezentované výsledky digitalizovány a následně vyobrazeny dohromady s výsledky získanými vytvořenými skripty GEM\_soft. Při parametrické analýze Dawalibi modeloval jednoduchý čtvercový zemnič s délkou hrany 30 m, který postupně uložil v hloubkách 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 50 m. Zemnič byl uložen v homogenním modelu půdy s rezistivitou 100 Ωm, proud zemničem byl 10 kA. Vypočtené průběhy GEM\_soft (Matlab) a podle Dawalibiho jsou vyobrazeny v Obr. 5-58 a Obr. 5-59. Ze získaných výsledků je zřejmá dobrá shoda s Dawalibim prezentovanými výsledky a tedy korektní reprodukce Dawalibiho analytického řešení.



Obr. 5-57 Jednoduchý čtvercový zemnič, podle Dawalibi [101]



*Obr. 5-58 Průběh potenciálu pro jednoduchý čtvercový zemnič uložený v různých hloubkách, část 1* 



*Obr. 5-59 Průběh potenciálu pro jednoduchých čtvercový zemnič uložený v různých hloubkách, část 2* 

# 5.3 Srovnání výpočtových metod

V této kapitole je provedeno zjednodušené porovnání všech výpočtových metod prezentovaných na vybraných příkladech. Užití zjednodušených vztahů spolu s koeficienty využití je referencováno k numerické metodě Ansoft Maxwell. Následně je rozebráno úskalí použití numerického a pokročilého analytického řešení podle Dawalibiho.

## 5.3.1 Zjednodušené vztahy

Z jednoduchého porovnání zjednodušených vztahů lze vypozorovat hlavní rozdíl v zahrnutí (Dwight, Osolsobě) a nezahrnutí (Rüdenberg) hloubky uložení zemniče do výpočtu. Je zřejmé, že toto zahrnutí a nezahrnutí bude mít podstatný vliv na sledované parametry zemniče uvedené na začátku kapitoly 5. Jelikož při užití těchto zjednodušených vztahů lze stanovit pouze zemní odpor uzemňovací soustavy R a zbylé parametry jsou dopočteny z tohoto odporu a proudu zemničem, tak má smysl provést porovnání pouze těchto vypočtených zemních odporů různými metodami. Toto porovnání je zde provedeno pro výpočet jednoduchého kruhového zemniče umístěného v homogenním modelu půdy. Zemní odpor tohoto zemniče byl vypočten celkem 4 různými metodami/vztahy (FEM je myšleno modelování zemniče v programu Ansoft Maxwell). Výsledné zemní odpory jsou pak v závislosti na měnící se hloubce uložení  $h_2$  a měnícím se průměru kruhového zemniče  $D_2$  vyobrazeny na následujících 2 obrázcích. Tyto výsledky byly prezentovány v konferenčním příspěvku [75]. Z průběhů vypočtených odporů je pak zřejmá dobrá shoda mezi hloubkově závislými vztahy (Dwight, Osolsobě) a relativně přesnou metodou konečných prvků FEM, a naopak je patrná značná nepřesnost při použití hloubkově nezávislého vztahu podle PNE [72], tedy stejného jak v EN 50522 [2].



*Obr. 5-60 Velikost odporu kruhového zemniče v závislosti na jeho hloubce uložení, pro různé metody výpočtu* 



*Obr. 5-61 Velikost odporu kruhového zemniče v závislosti na jeho průměru, pro různé metody výpočtu* 

Další odlišnost lze spatřovat v mírných rozdílech analytickych vztahů používaných v evropské [2], a potažmo i v české literatuře, a naproti tomu zjednodušených vztahů používaných v "americké" IEEE komunitě [6]. Jako příklad je zde vyobrazen rozdíl vztahů pro výpočet zemního odporu vertikálního tyčového zemniče. Vztah pro tyčový zemnič podle evropského standardu EN 50522 je totožný se vztahem Rüdenberga, naproti tomu vztah uváděný IEEE standardem 81 odpovídá Dwightově vztahu (5-23). Při vyjádření rozdílu mezi odpory stanovenými oběma vztahy lze pak získat následující vztah

$$R_{EN} - R_{IEEE} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} - \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - \ln 1 \right)$$

$$R_{EN} - R_{IEEE} = \frac{\rho}{2\pi l} \left[ \ln \frac{2l}{r} - \left( \ln \frac{4l}{r} - \ln e \right) \right]$$

$$R_{EN} - R_{IEEE} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left( \frac{2l}{r} \cdot \frac{r \cdot e}{4l} \right) = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{e}{2}$$
(5-79)

Při vynesení průběhu získané závislosti – výsledek v pravé straně poslední z rovnic - jsou pak získány průběhy absolutních rozdílů v ohmech, Obr. 5-62 (a) a v procentuálních hodnotách, Obr. 5-62 (b), vztaženo k IEEE vztahu. Z průběhů je zřejmé, že v závislosti na délce tyčového zemniče použití EN nebo IEEE vztahů vede k rozdílným výsledkům o cca 3.5(4.5)-6(8) %, přičemž vztahy pro vertikální tyčový zemnič jsou jako jediné oproštěny ze své podstaty o dříve diskutovanou chybu hloubkové nezávislosti různých vztahů. Velikost této chyby je závislá kromě délky tyčového zemniče také na velikosti průřezu tyčového zemniče, pro silnější tyče je pak chyba větší (hodnoty v závorkách), pro tenčí tyče pak menší (hodnoty bez závorek, hodnoty na obrázku pro d = 4 cm). Nicméně z průběhu samotného rozdílu v absolutních hodnotách je zřejmé, že samotná velikost tohoto rozdílu může nabývat i značně velkých hodnot. Pro nejčastěji očekávatelné typy půd spolu s předpokládatelnou délkou tyčového zemniče lze tak předpokládat rozdíl výpočtového odporu v řádech cca 3-50  $\Omega$ .



*Obr. 5-62 Odpor vertikální tyče, rozdíl mezi EN a IEEE, (a) v absolutních hodnotách, (b) v procentních* 

Použití uvedených zjednodušených vztahů na složitější typy zemničů je pak provedeno pomocí koeficientů využití. Přesto, že se jeví, že při použití hloubkově závislých vztahů je dosaženo relativně dobré shody mezi zjednodušenými vztahy a pokročilejší metodou – Ansoft Maxwell z Obr. 5-60 a Obr. 5-61, tak použití jedné nezávislé hodnoty koeficientu využití je značně problematické. Toto bylo detailněji diskutováno v kapitole 5.1.5 a autorem tato problematika publikována v [70], [74] a [75]. Z porovnání výpočtu podle zjednodušených analytických vztahů (Dwight, Osolsobě, PNE/EN) s výslednými odpory podle simulací v Ansoft Maxwell může docházet i k velkým rozdílům (průměrně cca 10-20 % chyba stanovení zemního odporu). Navíc, jak bylo diskutováno v kapitole 5.1.5, tak koeficienty využití jsou závislé na rozměrech zemničů. Toto je ilustrativně prezentováno na Obr. 5-63, kde je vyobrazen průběh rozdílu zemního odporu vnějšího kruhu a zachovaných zbylých parametrech konstantních.

Částečnou odpovědí na tento stav by mohl být přístup empirického stanovení rozměrově závislých koeficientů využití, tak jak bylo prezentováno v 5.1.5, [70], [75]. Příklad možných rozměrově závislých koeficientů využití je vyobrazen na Obr. 5-64. Úskalím takovéhoto přístupu ovšem je množství vstupujících proměnných do výpočtu, jelikož uvedená závislost uvažuje zbylé parametry za konstantní. Na základě provedených simulací se jeví, že by mohlo být možné upustit od hloubkové závislosti, neboť tato se jeví jako spíše slabá, viz Obr. 5-65. Situace se pak opět komplikuje v přítomnosti nehomogenních modelů půdy.



*Obr. 5-63 Porovnání výpočtu podle zjednodušených vztahů a s konstantními koeficienty využití a pokročilejšího výpočtu podle Ansoft Maxwell, podle [75]* 



*Obr. 5-64 Závislost koeficientů využití kombinací dvou obvodových zemničů (oo) a obvodového zemniče a základového zemniče (os) na průměru kruhového obvodového zemniče, podle [75]* 



*Obr.* 5-65 Závislost koeficientů využití dvou obvodových zemničů (00) a obvodového a základového (0s) na hloubce uložení vnějšího obvodového zemniče, podle [75]

## 5.3.3 Ansoft Maxwell vs Dawalibi

V neposlední řadě je nezbytné zmínit, že ani výsledky získané přímo numerickým řešením pomocí metody konečných prvků nelze brát jako definitivně referenční. Jak bylo poukázáno v kapitole 5.2.1 tak získané hodnoty jsou odvislé od nastavené přesnosti řešení (Percent Error) a dále od poloměru modelu okolní půdy, viz Obr. 5-49. Ač ideálního stavu lze dosáhnout velmi malou hodnotou Percent error a velkých modelů okolní půdy, tak z praktických důvodů má toto nastavení určité meze. Zlepšení obou uvedených parametrů vždy vede na:

- Nárůst času nezbytného pro simulaci (podle přesnosti se jedná o řád desítek minut až po jednotky až desítky hodin – pro provedení jedné simulace zemniče). Teoreticky nárůst času není shora nijak limitován. Prakticky je pak přesnost simulace a tedy potřebný čas limitován dostupnými výpočetními prostředky.
- Nárůst požadavků na hardwarové vybavení použité výpočetní stanice. Zde lze říci, že hlavní limitující položkou je velikost dostupné paměti RAM. Z provedených analýz lze říci, že množství potřebné paměti RAM stejně tak jako množství prvků sítě konečných prvků roste s vylepšujícími se iteracemi mírně rychleji jak exponenciálně. Pro rozsáhlejší modely a dosažení odpovídající přesnosti tak je zapotřebí značného množství dostupné volné operační paměti. Ze zkušenosti lze říci, že pro většinu menších zemničů je vhodných cca 16 GB paměti RAM. Pro větší zemniče např. mřížový podle Obr. 5-47, pak za minimum lze považovat cca 30-40 GB.
- Nestabilitu vytvářené sítě konečných prvků. Se zvětšujícím se modelem, např. uvedený mřížový zemnič Obr. 5-47, pak může vyžadovat složitější úpravy podmínek tvorby sítě konečných prvků. Při modelování především těchto větších, či komplikovanějších zemničů, Obr. 5-50, by byla vhodná důkladnější analýza nastavení a tvorby sítě konečných prvků. V rámci autorovy práce s tímto programem byl využívaný vestavěný adaptivní mesher, přičemž v některých případech se z dostupných dvou mesherů ukázal také Clasic jako fungující, nicméně toto nebylo pravidlem. Zpravidla byl nejprve použit pro svoji rychlost TAU mesher a až v případě selhání byl použit alternativní Clasic. Nicméně v některých případech nebylo dosaženo řešení bez potřebných úprav modelu.

Jak bylo tedy ukázáno na Obr. 5-49 tak odpovídajícím zlepšením obou parametrů lze dosáhnout rozdílů výsledného zemního odporu zemniče o cca 2-5% v uvedeném případě jednoduchého zemniče. Je zapotřebí zmínit, že tato přesnost simulace má také odpovídající vliv i na další vyhodnocované parametry zemniče jako je celkový nárůst potenciálu zemniče EPR či rozložení dotykových a krokových napětí. Při nevhodně zvolené přesnosti simulace pak lze získat až nekorektní výsledky. Pro získání představy chyby zvolené takovéto pokročilejší metody modelování lze pak získat částečný obraz o závažnosti tohoto efektu z porovnání výsledků z programu Ansoft Maxwell s reprodukovaným Dawalibiho analytickým řešením.

Porovnání je zde provedeno pro dva zemniče. Prvním příkladem je zemnič ve tvaru kříže skládající se ze 4 horizontálně zakopaných pásků. Každý pásek měl délku 30 m a celý zemnič byl zakopán v hloubce 0.5 m. Rozložení potenciálu v okolí těchto zemničů stanovené z obou těchto programů je vyobrazeno na Obr. 5-66 a Obr. 5-67. Z porovnání obou výsledků lze vyčíst, že celkový nárůst potenciálu zemniče spolu i se zemním odporem byl v případě Dawalibiho větší (94 vs 91.2 V) a (1.88 vs 1.824 Ω). Dále bylo provedeno porovnání různého nastavení zlepšujících parametrů obou výpočtových metod. V případě programu Ansoft Maxwell byly měněny velikosti okolního modelu půdy v rozsahu 80-750 m a dále byly získávány výsledky pro různé nastavení cílového Percent Error (zlepšující iterace) konkrétně 1, 0.7, 0.5, 0.3 a 0.1 %. V případě Dawalibiho

metody byla zkracována délka segmentů  $l_j$  (30, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 a 0.05 m). Hodnoty výsledných zemních odporů v jednotlivých zlepšujících iteracích jsou vyobrazeny na Obr. 5-68, kdy zlepšující se iterací jsou myšleny právě snižující se hodnoty Percent Error a délka segmentů.



Obr. 5-66 Rozložení potenciálu v okolí zemniče ve tvaru kříže stanovené programem Ansoft Maxwell



*Obr. 5-67 Rozložení potenciálu v okolí zemniče ve tvaru kříže stanovené reprodukovaným analytickým řešením podle Dawalibiho (GEM\_soft)* 



Obr. 5-68 Porovnání výsledného zemního odporu křížového zemniče stanovené podle programu Ansoft Maxwell a podle Dawalibiho

Z uvedených výsledků se jeví, že obě metody přibližně konvergují k velice podobnému výsledku, nicméně mezi nejlepšími výsledky zde zůstává stále rozdíl cca 3 %. Při spokojení se s rychlejším, ale méně přesným výsledkem v případě Ansoft Maxwell, pak může být chyba i větší (až 15 %).

Druhé porovnání je provedeno mezi samotným rozložením potenciálu na povrchu země v okolí mřížového zemniče podle Obr. 5-46, Obr. 5-47. Průběh potenciálu na povrchu země stanovený oběma metodami je vyobrazen na Obr. 5-69 a Obr. 5-73 pro dvě různé obměny uspořádání mřížového zemniče a pro odlišný model půdy. Zemnič byl uložen v hloubce  $h_e$  a hloubka povrchové vrstvy je zde označena jako *H*. Rozložení potenciálu je stanoveno pro poruchový proud 1000 A. Zemní odpory obou zemničů stanovené oběma metodami jsou uvedeny v Tab. 5-15. Rozložení potenciálu stanovené oběma metodami pak bylo provedeno porovnáním rozdílu obou průběhů. Rozdíl rozložení potenciálu na povrchu země mezi oběma metodami je pro daný model půdy vynesen na Obr. 5-70, Obr. 5-71 a Obr. 5-72, resp. Obr. 5-74, Obr. 5-75 a Obr. 5-76. Přestože v případě modelu 500/100/0.5 lze vypozorovat na rozložení potenciálu poněkud komplikovanější závislost, je zřejmé, že průběhy potenciálu pro Dawalibiho řešení a Ansoft Maxwell jsou víceméně posunuté o přibližně 95 V. Dále je patrné, že tento rozdíl není konstantní ve všech bodech povrchu a od hodnoty uvedeného posunutí ("offsetu" 95 V) se liší o +-(15-35) V. Zde lze jen těžko usoudit, který průběh je správnější. V případě modelu 500/100/2 jsou pak zřetelné ostré vrcholy pouze v bodech nad křížením zemnících tyčí.

Na základě autorem provedené širší analýzy více různých výsledků se jeví, že výskyt uvedených vrcholů je zapříčiněn podstatou Dawalibiho aplikovaným analytickým řešením. Jedním z problémů, který se vyskytuje při tomto řešení je nevhodné zvolení délky segmentů, na které jsou jednotlivé zemnící elektrody diskretizovány. Dawalibiho analytické řešení založené na kmitavé Beselově funkci pak v některých případech v blízkosti některých bodů začíná oscilovat. Na základě
provedených analýz se jeví, že vhodný způsob diskretizace zemnících elektrod vyžaduje hlubší analýzu [103].

Model půdy	$R_{ m Dawalibi}\left(\Omega ight)$	$R_{\mathrm{Ansoft}}\left(\Omega\right)$	<i>EPR</i> <sub>Dawalibi</sub> (V)	$EPR_{Ansoft}(V)$	Max TV 1m (V) <sub>Dawalibi</sub>
500/100/0.5	0.641	0.505	641	505	218 (34 % EPR)
500/100/2	0.993	0.854	993	854	484 (49 % EPR)

Tab. 5-15 Vypočtené parametry mřížových zemničů pokročilejšími metodami



Obr. 5-69 Průběh potenciálu v okolí mřížového zemniče stanovený Ansoft Maxwell a Dawalibi (GEM soft)



Obr. 5-70 Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibiho metodou a Ansoft Maxwell



*Obr. 5-71 Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibiho metodou a Ansoft Maxwell, pohled z boku z delší strany* 



*Obr. 5-72 Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibiho metodou a Ansoft Maxwell, pohled z boku z kratší strany* 



Obr. 5-73 Průběh potenciálu v okolí upraveného mřížového zemniče stanovený Ansoft Maxwell a Dawalibi (GEM soft)



Obr. 5-74 Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibi metodou a Ansoft Maxwell



*Obr.* 5-75*Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibi metodou a Ansoft Maxwell, pohled* z boku z delší strany



*Obr. 5-76 Průběh rozdílu potenciálu stanoveného Dawalibi metodou a Ansoft Maxwell, pohled z boku z kratší strany* 

### 5.4 Shrnutí a diskuze modelování zemničů

V inženýrské praxi se při navrhování zemničů lze setkat s mnoha rozličnými přístupy v případě výpočtu základních sledovaných parametrů zemničů. Tyto zahrnují přístupy od výpočtu skrze zjednodušené analytické vztahy až po pokročilejší analytická a numerická řešení úlohy elektromagnetického pole v prostoru. Z provedeného a prezentovaného porovnání je zřejmé, že využití různých přístupů může mít podstatný vliv na získané hodnoty sledovaných parametrů zemničů jakými jsou zemní odpor a s ním spojený nárůst potenciálu zemniče či dotyková a kroková napětí.

V rámci provedeného porovnání byly autorem implementovány jak zjednodušené analytické vztahy s využitím koeficientů využití, tak i pokročilejší analytické a numerické řešení. Přesto, že jsou tato pokročilejší řešení již relativně dostupná, využívají se v dnešní době stále v mnoha reálných aplikacích pouze zjednodušené výpočtové vztahy. Toto je podloženo i faktem, že uvedená zjednodušená řešení jsou stále citována v současnosti platnými národními i mezinárodními standardy jako jsou EN 50522 [2], PNE 33 0000-4(4) [64], či britskými [104]. Problémem širší implementace pokročilejších metod výpočtu je nezbytnost vlastnictví příslušného softwaru spolu s kvalifikovaným obslužným personálem. Dalším problémem je pak komplikovanost pokročilejších metod, které nelze jednoduše popsat několika jednoduchými vztahy a jejich implementace by vyžadovala dostupné programovací prostředí. V neposlední řadě je nezbytné zmínit, že pokročilejších metod výpočtu lze dohledat více a je tedy otázka, kterou uvažovat jako normativní. Současně při implementaci vlastního postupu může v důsledku provedené neúmyslné chyby dojít např. k chybnému řešení v některých stavech. Z výše uvedeného se tedy jeví, že ač zjednodušené vztahy disponují i značnými nedokonalostmi, jejich aplikace pravděpodobně bude nadále nezastupitelná. Jediným korektním řešením tak v případě uzemnění bude vždy provedení následného měření potvrzujícího dodržení odpovídajících bezpečnostních a provozních limitů.

V následujících podkapitolách jsou pak shrnuty zdroje odlišnosti výsledků mezi různými postupy, kvantifikace možných chyb a případné náměty pro další navazující výzkum. V další kapitole jsou pak tyto chyby rozebrány z pohledu vlivu na bezpečnost návrhu zemniče při použití pravděpodobnostního přístupu.

#### 5.4.1 Zdroje chyb

Odlišnosti mezi výsledky z různých výpočtových metod lze tedy předpokládat v důsledku:

- Zanedbání hloubky zemniče zjednodušených analytických vztahů.
- Více různých způsobů odvození zjednodušených vztahů (Rüdenberg x Dwight aj.).
- Nemožnost užití vícevrstvého modelu půdy (u zjednodušených vztahů).
- Užití jednoho průměrného koeficientu využití, který ve skutečnosti závisí na parametrech vícevrstvého modelu půdy a na rozměrech zemniče.
- Z náhrady složitějšího složení půdy jeho homogenním ekvivalentem (v případě nekorektně provedeného měření a vyhodnocení jeho výsledků).
- V případě numerického řešení metodou konečných prvků v prostřední Ansoft Maxwell je výsledek závislý na velikosti modelu okolní půdy a na přesnosti simulace a jí odpovídajícím způsobu tvorby sítě konečných prvků.
- V případě složitějšího analytického modelu skrze řešení Laplaceovy rovnice podle Dawalibiho jsou získané hodnoty závislé na způsobu tvorby a délce elementů do kterých je zemnič diskretizován. U tohoto modelu je dále dobré mít na paměti, že při jeho odvození byly zavedeny předpoklady:

- Konstantního potenciálu na povrchu celého zemniče (toto je využito k získání řešení, nicméně ověření této platnosti pro daný způsob segmentace je provedeno jen pro vybraný počet bodů odpovídající počtu elementů). Toto není ve skutečnosti pravda, jelikož na zemniči dochází k malým ohmickým úbytkům napětí, jak bylo naznačeno na Obr. 5-52.
- Vodiče zemniče jsou nahrazeny nekonečně tenkým vodičem (thin-wire assumption). Je uvažováno, že proud tekoucí tímto vodičem do země je do všech směrů stejný skrze lineární proudové hustoty jednotlivých elementů.
- Bylo použito pouze rovnoměrné dělení se stejnou délkou všech elementů.
- Řešení Laplaceovy rovnice bylo nalezeno ve tvaru součtu Besselových funkcí nultého řádu prvního a druhého typu. Jelikož se Besselova funkce druhého typu nultého řádu pro malé hodnoty blíží nekonečnu, byla v řešení zanedbána.
- Všechna zkoumaná řešení vycházela ze zjednodušení řešení elektromagnetické úlohy pouze jako jejího stejnosměrného kvazistatického ekvivalentu. Ač lze předpokládat, že toto zjednodušení je v mnoha případech dostatečnou náhradou [94], [98], může mít toto zjednodušení vliv na získané výsledky.

### 5.4.2 Kvantifikace chyb

V případě užití pouze zjednodušených analytických vztahů lze tedy předpokládat chybu oproti pokročilejším metodám ("+" předimenzování, "-" poddimenzování):

- V důsledku užití vztahu nezahrnující hloubku uložení zemniče dR +45-67 % Obr. 5-60,
   Obr. 5-61 vede v případě homogenního modelu půdy vždy na předimenzování.
- Při užití vztahů respektujících hloubku uložení zemniče dR ±1-2 %, zanedbatelné, může být způsobeno přesností výpočtu pokročilejší metody, podle Obr. 5-60, Obr. 5-61, použitelné pouze pro jednotlivé samostatné základní tvary zemniče, pro složitější tvary nepoužitelné.
- V důsledku nemožnosti užití vícevrstvého modelu půdy dR +14 % a -28 %, kdy u modelu LoH situace vede na poddimenzování (podle předchozího bodu lze předpokládat dobrou shodu mezi hloubkově závislými vztahy a pokročilejšími metodami Obr. 5-60, Obr. 5-61, tak tedy lze vyjít z porovnání podle Tab. 5-8, Tab. 5-9).
- V důsledku užití různých výpočtových vztahů EN/IEEE dR ±3.5-8 %, Obr. 5-62.
- V důsledku použití konstantních koeficientů využití může docházet k chybě použitého koeficientu využití cca dη ±0.1 od rozměrové závislosti při předpokladu homogenní půdy, v případě nehomogenní půdy pak další chybu dη ±0.1. Této kombinované chybě dη ±0.2 pak při průměrné hodnotě koeficientu využití 0.75, podle Tab. 5-5, odpovídá chyba určení zemního odporu dR +21 a -36 % (a v případě homogenního modelu s dη 0.1 pak dR +11 a -15 %), podle (5-30) a 5.1.5. V případě vícenásobného použití koeficientů využití pro složitější zemniče skládající se z více základních elektrod pak chyba může být ještě větší.
- V důsledku nezahrnutí všech elektrod zemniče, vede vždy na předimenzování, např. kruh s páskem uprostřed podle Obr. 5-48 (b) s porovnáním v Obr. 5-49 rozdíl dR +10.5 %.
- V důsledku neodhalení přítomnosti náhodného zemniče dR -35-44 %, podle Tab. 5-11 a Tab. 5-13, viz zde třetí odrážka a uvedené zdůvodnění.

V případě užití pokročilejších metod výpočtu pak v důsledku různě nastavené přesnosti a odlišnosti podstaty metody daného řešení lze předpokládat rozdíly mezi různými metodami:

- V důsledku nedostatečně zadané přesnosti na úkor rychlosti řešení dR +2 a -8.5-12 %
   Obr. 5-49 a Obr. 5-68.
- V důsledku použité pokročilejší metody Ansoft Maxwell (metoda konečných prvků) vs Dawalibi (řešení Laplaceovy rovnice) dR = ±2-5 %, v závislosti na použité metodě, podle Obr. 5-68.
- Z užití pouze homogenního modelu půdy namísto vícevrstvého, chyba dR stejná jak pro třetí odrážku analytických vztahů (dR +14 % a -28 %).

Výhodou užití pokročilejších metod výpočtu je pak možnost přímého určení dalších parametrů jako jsou dotyková a kroková napětí. Při užití pouze zjednodušených vztahů je dotykové napětí nejčastěji určeno jako ½ (či až ¼) celkového nárůstu potenciálu zemniče [2]. Z Tab. 5-7, Tab. 5-8, Tab. 5-9 a Tab. 5-15 a výsledků v Příloha A je sice zřejmé, že tento předpoklad je blíže horní hranici dosahovaných dotykových napětí, nicméně v provedených simulacích dosahovala dotyková napětí i větších hodnot a to 1-71 % EPR, tj. až o 21 % více než u uvedeného zjednodušení 1/2 EPR. Uvedené hodnoty pak platí pro dvouvrstvý model půdy. Relativně závažnou situací, která má výrazný vliv na velikost vypočtených dotykových napětí, je užití zjednodušeného homogenního modelu půdy. V těchto případech byla vypočtená dotyková napětí menší než u nahrazovaného skutečného dvouvrstvého modelu půdy (tj. jen pouze 55-70 % dotykového napětí skutečného dvouvrstvého mapětí použito pokročilejších metod, je nezbytné půdu vhodně modelovat a zjednodušený homogenní model použít pouze v kombinaci s výpočtem EPR/2 neboť takto může dojít k poddimenzování návrhu.

Další nezanedbatelným zdrojem chyb je nejistota přiřazení parametrů modelu půdy např. v důsledku nevhodné interpretace naměřených zdánlivých rezistivit půdy. Pakliže jako standardní model bude uvažován dvouvrstvý horizontální, tak chyba přiřazení rezistivity spodní vrstvě půdy vyjádřená koeficientem odrazu může být  $\Delta K = \pm 0.2$  a chyba určení hloubky povrchové vrstvy  $\pm$ (1-2 m), podle 5.1.6.1. Této chybě určení parametrům půdy pak při užití Dawalibiho metody výpočtu parametrů zemničů odpovídá chyba určení dotykových a krokových napětí  $\pm$ 2-4 %, chyba stanoveného odporu uzemnění a celkového nárůstu potenciálu zemniče  $\pm$ 6-42 %, přičemž situace se jeví být mnohem horší v případě modelu LoH, podle Tab. 5-7. Chybné určení rezistivity povrchové vrstvy půdy v případě LoH modelu půdy může vést k velkým chybám, kdy tedy určení dotykových a krokových napětí je s chybou  $\pm$ 3-9 % a chyba stanovení zemního odporu a celkového nárůstu potenciálu zemniče až  $\pm$ 240 %. V případě, že by se skutečný model půdy více podobal vertikálnímu modelu (i šikmému) a tento byl dále modelován jako dvouvrstvý horizontální, tak byla simulacemi zjištěna chyba stanovení zemního odporu dR  $\pm$ 5-25 %. Přičemž tuto chybu lze chápat jako v souladu s nepřesností určení parametrů dvouvrstvého modelu půdy. V případě těchto vertikálních modelů by bylo vhodné doplnit simulace o vliv na dotyková napětí.

Poslední zkoumanou problematikou byla přítomnost náhodného zemniče. Z provedené analýzy je zřejmé, že jeho neodhalení v důsledku nedostatečné interpretace výsledků měření rezistivity půdy může vést ke značným chybám. Z tohoto pohledu se jako nejhorší možný případ jeví náhrada zkoumaných horizontálních modelů jejich homogenní náhradou, která vede v případě jak dotykových napětí, tak i samotného zemního odporu k poddimenzování o více jak -50 % (Tab. 5-10 až Tab. 5-14). V tomto případě lze jednoznačně doporučit provedení měření rezistivit ve více směrech, které by mělo pomoci přítomnost náhodného zemniče odhalit.

### 5.4.3 Doporučení pro další a navazující výzkum

Z provedených porovnání se jeví, že další hlubší analýza by byla vhodná pro:

- Stanovení koeficientů využití závislých na délkových a hloubkových rozměrech zemničů spolu se závislostí na parametrech vícevrstvých (dvouvrstvého) modelů půdy. Zde by byla vhodná analýza jen vybraných nejčastějších uspořádání zemničů pro něž by byly stanoveny závislosti koeficientů využití. Z provedených analýz se jeví, že by mohlo být vhodné upustit od hloubkové závislosti koeficientu využití, ač toto by bylo vhodné ověřit i pro další uspořádání zemničů.
- Detailnější analýzu metod tvorby sítě konečných prvků se zaměřením na tvorbu vlastního generátoru sítě konečných prvků speciálně pro modelování zemnících soustav. Síť by byla importována do solveru v programu Ansoft Maxwell.
- V případě reprodukovaného skriptu GEM\_soft podle Dawalibiho se ukazuje, že rovnoměrné dělení zemniče na jednotlivé elementy není příliš vhodné a bylo by lepší implementovat jiné komplikovanější nerovnoměrné dělení. Jedná se tedy o návrh metodiky vhodného dělení různých tvarů a typů zemnících elektrod.
- Jelikož všechna uvedená řešení počítají pouze se stejnosměrnými ustálenými poli, bylo by v další práci vhodné implementovat řešení i v nízkofrekvenční střídavé oblasti a získané výsledky porovnat s dosavadními (tj. zemní impedance, rozložení dotykových napětí atp.). V případě programu Ansoft Maxwell se toto jeví jako poněkud obtížný úkol, který by možná mohl být částečně dosažitelný v případě zavedení vlastního generátoru sítě konečných prvků. V případě reprodukovaného skriptu GEM\_soft by tohoto řešení mohlo být nejspíše dosaženo pouze získáním odpovídajícího rozložení proudu v jednotlivých segmentech řešením momentové úlohy a Sommerfeldových integrálů [57], [97], přičemž by byly zanedbány vířivé proudy uvnitř vodiče zemniče.
- Pro rozšíření obrazu o možných chybách modelování a měření zemničů přichází dále v úvahu
  - o Jiná umístění náhodného zemniče.
  - Určení do jaké hloubky má vliv tloušťka povrchové vrstvy dvouvrstvého modelu půdy na sledované parametry zemniče (tj. od jaké hloubky je ji možné zanedbat při modelování).
  - Provedení porovnání ostatních zjednodušených analytických vztahů, obdobně jako provedené porovnání pro tyčový zemnič podle Rüdenberga a Dwighta.
  - Analýza zjednodušených empirických vztahů pro modelování armování betonu jakožto zemnících elektrod podle Kočvary [71] a stanovení jejích možných úskalí a případných chyb sledovaných parametrů.
  - Kvantifikace chyb při měření uzemnění ve vícevrstvém modelu půdy pro různé rozmístění měřících elektrod a použitou metodu měření [122].
- Analýza rozdílů při měření nezatížených a zatížených dotykových napětích. Autorovy předběžné analýzy ukazují, že zatížená dotyková napětí mohou být značně menší, jak nezatížená dotyková napětí, což může vést nesrovnalostem mezi navrhovaným a změřeným dotykovým napětím.

### 5.4.4 Vliv způsobu modelování zemniče a pravděpodobnostní přístup

V dosavadní literatuře byly uvažovány mimo jiné jako možné příčiny náhodnostního chování sledovaných parametrů zemničů:

- Různá místa výskytu poruchového místa toto z pravděpodobnostního hlediska znamená dvě úskalí:
  - Různá velikost poruchového proudu v důsledku různé impedance poruchové smyčky.
  - Výskyt zvýšených potenciálů i na jiných zařízeních, než s poruchou (zemnících soustavách) v důsledku propojení zemnících soustav skrze zemnící lana, kabelové stínění atp. Tedy riziko úrazu u dané zemnící soustavy bude vyšší, než když je provozována samostatně.
- Různě pravděpodobný výskyt různých typů poruch, kterým odpovídají také různě velké poruchové proudy (1f, 2f, 3f atp.).
- Proměnlivost velikosti dotykových napětí, např, v důsledku různých okolností dotyku, v důsledku změn počasí a variaci rezistivity půdy atp.
- Proměnný čas trvání poruchy.

Variaci těchto parametrů může projektant do návrhu zemniče zahrnout

- Při deterministickém přístupu nejhoršího scénáře volbou těchto parametrů takových, že vedou na nejhorší možný scénář.
- Při pravděpodobnostním přístupu návrhu zemniče pomocí modelování těchto parametrů jejich odpovídajícím pravděpodobnostním rozdělením, případně zjednodušeně provedením citlivostní analýzy s ohledem na meze očekávatelné změny těchto parametrů.

Pravděpodobnostním chováním zde lze také zjednodušeně chápat "nepřesnost" s jakou projektant stanoví sledované parametry zemniče v důsledku jejich nevhodného modelování v průběhu návrhu – tj. nedostatečně provedené měření rezistivity půdy, volba pouze homogenního modelu půdy, užití pouze zjednodušených vztahů atp. Jelikož tedy cílem práce byla aplikace pravděpodobnostního přístupu na zemniče v distribučních soustavách (a to i např. distribuční trafostanice se společným uzemněním), kde jak bylo uvedeno na začátku kapitoly 5.4 lze stále předpokládat používání těchto zjednodušení, tak výsledky z provedené analýzy různého modelování zemničů byly použity pro kvantifikování jejich vlivu na spočtené hodnoty rizika. Získané odchylky sledovaných parametrů zemničů v důsledku jejich různého modelování jsou pak diskutovány na výsledcích citlivostní analýzy v kapitole 6.6.2.

# 6 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ PŘÍSTUP PRO NÁVRH ZEMNIČŮ

Při současném návrhu zemničů je zaveden deterministický přístup uvažovaného nejhoršího scénáře, jak bylo diskutováno v kapitole 2. Postup podle tohoto scénáře je schematicky znázorněn na Obr. 2-2. Při tomto návrhu je zemnič považován za bezpečný v případě, že spočtené či změřené dotykové napětí je v nejhorším případě menší jak dovolené dotykové napětí  $V_{vtp}$ . V normě EN 50522 je uvedena křivka těchto dovolených dotykových napětí (Figure 4, v EN 50522:2010 [2]). V příloze B této normy je tato křivka vyobrazena na obrázku Figure B.2 EN 50522:2010 [2] spolu s dalšími 4 křivkami pro různé kontaktní scénáře. Tyto křivky dotykových napětí jsou v tomto dokumentu vyobrazeny na Obr. 6-1 (pozn. obrázek byl reprodukován jeho digitalizováním – tj. odečtem bodů prostřednictvím webového nástroje pro digitalizaci grafů [106]).



Obr. 6-1 Dovolená dotyková napětí podle EN 50522 pro různě velké přídavné rezistance

K těmto křivkám je nezbytné zmínit, že již samy o sobě byly odvozeny za předpokladu užití křivky c2 udávající proudově časovou závislost s konstantní pravděpodobnostní fibrilace rovné 5 procentům, podle Figure 20 normy IEC/TS 60479-1:2005 [4] (v tomto dokumentu reprodukované na Obr. 2-1). Vzhledem k faktu, že křivka 1 na Obr. 6-1 byla odvozena jako váhovaný průměr 4 různých dotykových scénářů (levá ruka obě nohy váha 1, pravá ruka obě nohy váha 1, obě ruce obě nohy váha 1 a levá ruka pravá ruka váha 0.7 podle přílohy A EN 50522) není zcela jasné, jaká je tedy takto dovolená míra rizika těchto křivek. Při určitém zjednodušení se lze domnívat, že tedy současný deterministický přístup nejhoršího scénáře dovoluje přibližně míru rizika vzniku fibrilace podle použité křivky c2 Obr. 6-1 okolo 5 %.

Je ovšem nezbytné skutečné riziko vnímat také ve světle faktů, že "*výskyt poruchy, amplituda poruchového proudu, doba trvání poruchy a přítomnost osoby jsou pravděpodobnostní povahy*" [2]. Jinými slovy riziková situace, která může vést na fatální událost, jakou může být úmrtí osoby v důsledku úrazu elektrickým proudem, může nastat jen a pouze tedy když

1. Osoba je v kontaktu s neživou částí elektrického zařízení, která se stane při poruše živou a osoba dále při vzniklé poruše překlenuje část potenciálu vzniklého na neživé části (jako

např. rozdíl potenciálu na povrchu země a na částech zemniče – dotyková a kroková napětí).

2. V současné chvíli dotyku osoby dojde k poruše na elektrickém zařízení, která způsobí nárůst potenciálu na dané neživé částí a učiní ji tak živou.

Dále pak oproti uvažovanému nejhoršímu scénáři je zapotřebí uvážit, že

- 3. Nárůst potenciálu na dané neživé části může nastat i v důsledku výskytu poruchy kdekoliv v propojeném elektrickém rozvodu zavlečením potenciálu např. skrze stínění kabelů, zemnící lana, PEN vodič atp. (tedy počet poruchových stavů v místě dotyku vedoucí na rizikovou situaci je větší, než pokud by se uvažovaly poruchy pouze na daném konkrétním zařízení. Velikost vzniklého/zavlečeného potenciálu ve většině případů pak ovšem ale nedosahuje úrovně rizikovosti jako v případě uvažovaného nejhoršího scénáře).
- 4. Porucha je vypnuta obvykle do času nastavení přiřazené ochrany, ve výjimečných případech pak až do nastaveného času působení záložní ochrany. Ve skutečnosti lze ovšem očekávat vypnutí i rychlejší, obecně pak časy působení ochrany budou kopírovat určité statistické rozložení s odpovídající střední hodnotou a rozptylem [33].
- 5. Dále lze předpokládat, že všechny další možné parametry mající vliv na velikost poruchového proudu a velikost vzniklých potenciálů mohou nabývat mírně odlišných hodnot, než jak byly uvažovány v průběhu návrhu podle nejhoršího scénáře a to v důsledku stochasticity různých působících jevů (např. počasí, stáří a různé opotřebení materiálu, dalšími parametry pak jsou např. rezistivita půdy, přítomnost a kvalita povrchové vrstvy, bot atp.).

V případě již vzniku rizikové situace při současném naplnění bodů 1 a 2 pak dále k situaci s fatálními následky doje až pokud

- 6. Proud lidským tělem zasažené osoby dosahuje úrovně pro způsobení fibrilace, ovšem jev vzniku fibrilace není deterministického charakteru, ale nastává jen v určitém procentu případů pro danou úroveň proudu a délku jeho působení.
- 7. Odpor lidského těla v případě působení potenciálu bude nabývat hodnoty, která spolu s velikostí působícího potenciálu bude vytvářet proud dostatečně velký pro vznik fibrilace podle bodu 6. Je nezbytné si uvědomit, že odpor lidského těla je jednak závislý na velikosti přiloženého potenciálu, délce jeho působení a také se jeho velikost stochasticky mění v průběhu času jak pro jednotlivce, tak i v rámci populace.

Je tedy zřejmé, že pro vznik rizikové situace s fatálními následky musí být naplněno současně několik stochastických jevů, tedy

- Postižená osoba je v kontaktu s neživou částí.
- V elektrickém rozvodu nastane porucha, která způsobí, že neživá část se stane živou.
- Porucha nastala v takové blízkosti, že vzniklý poruchový proud a ním vzniklý potenciál dosahuje úrovně, která může být pro osobu v kontaktu nebezpečnou.
- Osoba je v takovém kontaktu, který vede na nebezpečnou situaci, tj. překlenuje nebezpečně velký potenciál.
- Odpor osoby nabývá v rámci jeho stochasticity pro danou osobu a situaci nebezpečně nízké hodnoty.
- Rezistivita povrchové vrstvy půdy a přídavných izolací jakou jsou boty atp. dosahuje nebezpečně nízkých hodnoty (staré boty, nové boty, prorostlá kamenitá úprava povrchu, déšť atp.).

 Proud tělem postižené osoby zohledňující všechny výše uvedené faktory dosahuje nebezpečně vysoké hodnoty, a u dané postižené osoby způsobí komorovou fibrilaci s fatálními následky.

Z výše popsaného stochastického chování je pak docela dobře zřejmé, proč přes dovolenou relativně vysokou úroveň fibrilace v až 5 % případů podle křivek dotykových napětí podle Obr. 6-1, prakticky ve zpravodajství chybí zdokumentované případy, kdy by docházelo k fatálním následkům v důsledku úrazů elektrickým proudem. Pravděpodobnost vzniku fatální situace lze tedy předpokládat v důsledku všech uvedených a mnohých dalších parametrů řádově nižší.

Faktory uvedené v jednotlivých výše uvedených bodech lze při znalosti jejich statistického rozložení modelovat odpovídajícím teoretickým, či empiricky stanoveným rozložením. Obecně správný postup řešení takovéto úlohy by byl skrze odvození analytické formule popisující tyto závislé a nezávislé jevy jejich podmíněnými a nepodmíněnými pravděpodobnostmi. V tomto případě je ovšem vhodné podotknout, že triviálního řešení skrze prosté analytické řešení prakticky nelze dosáhnout v důsledku silné provázanosti a mnohaúrovňové závislosti všech uvedených jevů. Relativně korektním řešením je užití metody Monte Carlo pro stanovení úrovní nebezpečí a úrovní odolností. Pro stanovení úrovní nebezpečí jsou nezbytné statistiky o četnosti výskytu poruch, místu výskytu poruch, rekonfiguracích sítě, úrovních poruchových proudů, časech působení ochran atp. Pro stanovení úrovní odolností lze vyjít z rozložení pravděpodobností fibrilace, velikostí odporu lidského těla, velikostí odporů přídavných rezistancí aj. Pomocí konvoluce obou rozložení (nebezpečí a odolností) je pak stanovena pravděpodobnost, že daná úroveň rušení bude větší jak úroveň odolnosti viz kapitola 2 a Obr. 2-6. Pravděpodobnost, že pro danou osobu dojde k fatální situaci je pak ještě zapotřebí korigovat pravděpodobností koincidence, tedy podle nezbytnosti naplnění bodů 1 a 2 výše. Při předpokladu, že vznik situace a její následek (fatálnost) jsou nezávislými jevy, pak výslednou pravděpodobnost vzniku fatální situace (rizika) lze stanovit jako

$$P_{IR} = (P_{applied} * P_{withstand}) \cdot P_{coic} \tag{6-1}$$

Kde  $P_{IR}$  značí pravděpodobnost rizika (individuálního rizika viz kapitola 6.1),  $P_{applied}$  pravděpodobnostní rozložení úrovní nebezpečí,  $P_{withstand}$  pravděpodobnostní rozložení úrovní odolností,  $P_{coic}$  pravděpodobnost koincidence a znak \* značí konvoluci uvedených rozložení.

Jelikož provedení plné metody Monte Carlo je relativně zdlouhavá záležitost, která v důsledku mnoha simulovaných náhodných veličin vyžaduje velké množství simulovaných jevů a dále předpokládá znalost mnoha dnes víceméně neznámých rozložení velikostí uvedených vstupujících parametrů, tak v současné době jsou do inženýrské praxe tyto přístupy zavedeny spíše zjednodušeně. Jak australský (EG-0 [37]) tak i britský přístup (BS EN50522 [35]) zavádějí pouze zjednodušený expertní přístup nejhoršího scénáře s prvky pravděpodobnostního vyhodnocení především v oblasti úrovní fibrilací, rozložení odporů lidského těla a pravděpodobnosti koincidence.

Pro výpočet rizik zemničů a provedení dalších rozšiřujících analýz tak byl v této práci reprodukován pravděpodobnostní přístup obdobný jako v EG-0. Jelikož pro provedení různých citlivostních analýz je vhodné disponovat primárními zdrojovými kódy, kdy je možný přístup ke změnám prakticky všech parametrů v libovolných mezích, byla metodika pravděpodobnostního výpočtu reprodukována podle dostupných publikací. Využití dnes dostupných nástrojů jako jsou Argon či Argonium [38], [39] by sice bylo možné, nicméně možnosti obměn všech různých parametrů jsou v těchto nástrojích značně limitované, tento software neumožňuje větší automatizaci výpočtu a dále při jejich používání byly v dřívějších verzích objeveny problémy

s knihovnami NET.Frameworku. Další diskuze odlišností reprodukovaného pravděpodobnostního přístupu v porovnání s jinými přístupy byla provedena v kapitole 4. Při tomto reprodukovaném přístupu byly podle dostupných zdrojů vytvořeny skripty v programu Matlab označené jako *Erisk* modelující

- Odpor lidského těla pro různé velikosti přiložených napětí a pro různé dráhy proudu tělem.
- Stanovena rozložení pravděpodobnosti fibrilace pro různé velikosti proudu a doby jeho průtoku.
- Výpočet koincidence pomocí pravděpodobnostních rozložení.
- Byly stanoveny scénáře dotyku v sítích NN.
- Vytvořen zjednodušený model distribuční sítě VN pro výpočet a použití pravděpodobnostního přístupu na zemnič distribuční trafostanice.

V rámci sestrojených skriptů pak byly zkoumány doposud víceméně nepublikované analýzy a to

- Vlivu použití odporu lidského těla jako prosté hodnoty odpovídající 5, 50 a 95 procentní hodnoty odporu v populaci v porovnání s implementací celé plochy jejich rozložení.
- Vlivu různé dráhy proudu tělem.
- Vlivu zvolených křivek c1 až c4 při proložení plochy rozložení pravděpodobnosti fibrilace.
- Vlivu modelování přídavné izolace obuvi jako prosté hodnoty namísto jejího statistického rozložení.

Pro naplnění cíle užití pravděpodobnostního přístupu také pro vyhodnocení zemničů v distribučních sítích vysokého napětí (např. u distribuční trafostanice) pak byly pro vytvořený zjednodušený model distribuční sítě provedeny citlivostní analýzy mapující možnosti změny rizika při změně mnoha různých parametrů. V této podkapitole pak byly dále diskutovány možnosti chyb vznikajících v důsledku nevhodného modelování zemničů tak jak byly analyzovány v kapitole 5.

Výše uvedené analýzy jsou dále popsány v jednotlivých kapitolách.

# 6.1 Filozofie rizika

Dříve než bude přistoupeno k popisu výsledků provedených analýz, je nezbytné nastínit problematiku a definici rizika. Přestože k této problematice existuje nespočet publikací [37], [107]-[113] a tato metodika je relativně rozsáhnou vědní oblastí, tak si zde uvedený rozbor klade za cíl nastínit jen informace nezbytné pro pochopení získaných výsledků. Je dále dobré zmínit, že popis a vyhodnocování míry rizika je do značné míry filozoficky-morálním až politickým tématem a stanovení mezí tolerovatelných rizik je společensky velmi citlivým úkolem.

Při posuzování a vyhodnocování míry rizika je zapotřebí přijmout fakt, že již samotná podstata lidského bytí, stejně tak jako jakákoli lidská činnost, je spojena s určitou mírou rizika. Pod pojmem rizika lze obecně chápat míru s jakou dojde pro vybranou činnost k nepříznivému výstupu této činnosti. Může se tak například jednat o riziko ztráty peněz, riziko poškození zdraví, majetku či v nejhorším případě až riziko úmrtí člověka. Jelikož v rámci této práce, a i v uvedené literatuře, se pod pojmem rizika uvažuje s nejhorším možným scénářem, bude pod pojmem rizika dále myšleno riziko úmrtí a to pro oblast návrhu zemničů pak v důsledku úrazu elektrickým proudem. V následujících tabulkách Tab. 6-1 až Tab. 6-4 jsou pro příklad uvedeny míry rizika pro různé činnosti lidského života spolu s uvedenými hodnotami rizika úmrtí při jejich výkonu.

Průměrná míra rizika	Činnost
úmrtí za rok	
10 <sup>-4</sup> až 10 <sup>-3</sup>	Všechny příčiny
10 <sup>-4</sup> až 10 <sup>-3</sup>	Dopravní nehoda
10 <sup>-5</sup> až 10 <sup>-4</sup>	Pracovní nehoda
10-5	Utopení
10-5	Letecká doprava
10 <sup>-6</sup> až 10 <sup>-5</sup>	Přírodní katastrofa
10-6	Kouření 3 US cigaret
10 <sup>-6</sup>	Dvoudenní pobyt v New Yorku nebo Bostonu (vývin rakoviny v důsledku znečistění obvzduší)
10-6	Šestiminutová plavba v kánoi
< 10 <sup>-7</sup>	Zasažení bleskem

Tab. 6-1 Individuální míra rizika úmrtí osoby při výkonu daných činností, 1996, [107]

Tab. 6-2 Individuální míra rizika úmrtí osoby v důsledku různých příčin, 2001 UK, [110]

Průměrná míra rizika úmrtí za rok	Příčina
1/387 (2.6 x 10 <sup>-3</sup> )	Rakovina
1/3137 (3.2 x 10 <sup>-4</sup> )	Zranění, otrava
1/4064 (2.5 x 10 <sup>-4</sup> )	Všechny nehody
1/16800 (6.0 x 10 <sup>-5</sup> )	Dopravní nehody
1/1510000 (6.6 x 10 <sup>-7</sup> )	Požár
1/18700000 (5.3 x 10 <sup>-8</sup> )	Zasažení bleskem

Příčin vzniku rizika úmrtí člověka existuje nepřeberné množství. Obecně lze tato rizika dělit na dva druhy a to jako

- Dobrovolná.
- Nedobrovolná.

K častým příčinám vzniku **dobrovolných rizik** lze například přiřazovat rizika spojená s praktikováním extrémních sportů jako je horolezectví, seskoky s padákem, automobilové a motocyklové závodění, ale i například používání automobilu jako dopravního prostředku atp. Tato rizika lidé obvykle podstupují dobrovolně a nejsou tedy do dané činnosti ničím nuceni. Takovémuto riziku se pak mohou osoby jednoduše vyhnout nepraktikováním dané aktivity.

Průměrná míra rizika úmrtí za rok	Odvětví
1/125000 (8.0 x 10 <sup>-6</sup> )	Průměr všech odvětví
1/50000 (2.0 x 10 <sup>-5</sup> )	OSVČ
1/9200 (1.1 x 10 <sup>-4</sup> )	Dobývání uhlí a dalších hornin
1/17000 (5.9 x 10 <sup>-5</sup> )	Stavebnictví
1/20000 (5.0 x 10 <sup>-5</sup> )	Těžební průmysl
1/17200 (5.8 x 10 <sup>-5</sup> )	Zemědělství, lesnictví
1/34000 (2.9 x 10 <sup>-5</sup> )	Hutnictví
1/77000 (1.3 x 10 <sup>-5</sup> )	Ruční výroba
1/500000 (2.0 x 10 <sup>-6</sup> )	Elektro-ruční výroba

*Tab. 6-3 Individuální míra rizika úmrtí zaměstnance v různých průmyslových odvětvích, 2001 UK, [110]* 

Tab. 6-4 Individuální míra rizika úmrtí různých věkových skupin, 2001 UK, [110]

Průměrná míra rizika úmrtí za rok	Skupina
1/97 (1.0 x 10 <sup>-2</sup> )	Celá populace
1/6907 (1.4 x 10 <sup>-4</sup> )	Mládež chlapci 5-14 let
1/8696 (1.1 x 10 <sup>-4</sup> )	Mládež dívky 5-14 let
1/637 (1.6 x 10 <sup>-3</sup> )	Muži 35-44 let
1/988 (1.0 x 10 <sup>-3</sup> )	Ženy 35-44 let
1/36 (2.8 x 10 <sup>-2</sup> )	Muži 65-74 let
1/51 (2.0 x 10 <sup>-2</sup> )	Ženy 65-74 let

V případě **nedobrovolného rizika** je situace poněkud odlišná. Nedobrovolná rizika jsou taková, kterým se lidé nemohou jednoduše vyhnout. Může se například jednat o zásah bleskem, utonutí v důsledku tsunami, úmrtí v důsledku zemětřesení a obecně přírodních katastrof. Jinými příčinami může být například úmrtí v důsledku zhoubných nemocí jako jsou rakoviny, či v důsledku nemocí z ozáření nebo znečištění ovzduší. Nedobrovolným rizikem lze také chápat úmrtí v důsledku úrazu elektrickým proudem v okolí zemnící soustavy.

Je potřeba zmínit, že dobrovolná i nedobrovolná rizika lidé nepodstupují jen tak bezmyšlenkovitě, ale dané aktivity jsou obvykle podstupovány za účelem získání nějakých přínosů/benefitů. V případě uvedených dobrovolných rizik se tak například může jednat o pocit vnitřního štěstí a psychické vyrovnanosti, či například získaného pohodlí, úspoře času či navýšení příjmů dané osoby při dopravě automobilem. Podobně je tomu také v případě vznikajících nedobrovolných rizik, které jsou spjaty s využíváním elektřiny, jakožto velice výhodným a dostupným energetickým zdrojem. Obecně tedy daná rizika jsou podstupována za účelem získaných určitých přínosů/benefitů. Ideálního stavu by bylo dosaženo, pakliže by se rizika spojená s danými činnostmi dala maximálně minimalizovat či až odstranit. Toto však obvykle není možné, neboť s každým dalším snižováním míry rizika obvykle neúměrně rostou náklady na jejich odstranění. Vzniká tak jakási "nerovnovážná" soustava, kdy je hledáno optimum mezi vynaloženými prostředky na eliminaci rizika a získanými přínosy dané aktivity.

Pozn. V případě využívání elektřiny se jedná o většinový názor společnosti a tedy pro její odpůrce pak přítomnost veškeré infrastruktury pro výrobu, přenos a užití elektrické energie může představovat zdroj nedobrovolného rizika, přestože přínosy pro ně se jeví být nevyvážené. V současné době převažuje názor, že přínosy využívání elektřiny zdaleka přesahují vznikající rizika.

Dále je zapotřebí zmínit, že požadavek na eliminaci jednoho rizika může způsobovat nárůst rizika jiného. Příkladem může být dnes silně diskutovaný a podporovaný přechod na využívání energie z obnovitelných zdrojů. Je nezbytné si uvědomit, že např. eliminace vypouštění zplodin z konvenčních elektráren a tedy snížení rizik spojených s nemocemi dýchacích cest, či i "problémů" globálního oteplování na jedné straně sebou nese nárůst rizik spojených s výrobou, provozem a likvidací polovodičových a akumulačních systémů, jako je těžba a zpracování lanthanoidů a těžkých kovů na straně druhé. Dále pakliže by byly vynaloženy všechny prostředky na eliminaci jen jednoho konkrétního rizika, tak toto by sice neslo pro danou činnost kýžený efekt, nicméně tyto chybějící finanční prostředky by nebyly využity na eliminaci rizik jiných. Tím by mohlo docházet ke stavu, že absolutní eliminace jednoho rizika by vedla k nárůstu rizik ostatních a v globálním měřítku pak k celkovému zhoršení situace, než pokud by byly prostředky rozděleny rovnoměrněji na eliminaci všech souvisejících rizik, neboť jednotlivá dobrovolná a nedobrovolná rizika se pro dané osoby sčítají. Je tedy zřejmé, že problematika řízení rizika může vyžadovat relativně složitých systémových analýz pro dosažení minimální úrovně rizika za současného vynaložení rozumného množství finančních prostředků.

V případě některých nedobrovolných rizik, jako jsou například ta spojena s využíváním elektřiny, kdy ve společnosti většinově převládají přínosy nad riziky, pak lze položit otázku, jaká míra rizika by měla být vyžadována jako tolerovatelná a jaká jako již netolerovatelná. V současnosti, s ohledem na slučování společnosti do převládajícího státního uskupení, pak obvykle tuto úlohu stanovování akceptovatelných mír rizik přebírají různé standardizační, regulační či vládní úřady. Tyto obvykle vydávají různá nařízení a doporučení respektující obvykle současný stav poznání a rozvoj techniky. V případě společnosti (uskupení více lidí) lze pozorovat dva odlišné způsoby chápání rizika, pro které jsou v současnosti uplatňovány odlišné stanovené limitní hodnoty.

Prvním, relativně zřejmým chápáním rizika je **riziko individuální**. Velikost tohoto rizika říká, jaká je pravděpodobnost, že pro jednotlivce z dané společnosti dojde při dané činnosti k úmrtí. Velikosti individuálních rizik pro různé činnosti byly uvedeny v Tab. 6-1 až Tab. 6-4. Hodnoty tohoto rizika se zpravidla udávají jako roční. Podle uvedených tabulek lze například tedy říct, že pravděpodobnost úmrtí průměrného muže ve věku 35-44 let v důsledku všech možných příčin je 1 ku 637 v daném kalendářním roce, neboli 0.16 %. Při zavedení předpokladu, že pravděpodobnost úmrtí je pro všechny muže v dané věkové skupině stejná, tedy například úmrtí jednoho muže nijak neovlivní pravděpodobnost úmrtí druhého muže, lze na danou hodnotu pohlížet také tak, jak byla získána a to tedy, že např. z populace 637 mužů právě jeden v daném kalendářním roce zemřel. Jinými slovy, jestliže v letech 1999-2001, kdy byl proveden uvedený výzkum, dosahovala populace Velké Británie přibližně 59 milionů, tak v uvedených letech v dané věkové kategorii zemřelo přibližně 92 tisíc mužů. Jiným způsobem chápání a výkladu této hodnoty individuálního

rizika pak je předpoklad časové nezávislosti a tedy, že uvedená pravděpodobnost 1 ku 637 znamená, že daný jedinec umře jednou za 637 let. Tento výklad je ovšem mírně v rozporu s teorií a chováním pravděpodobnosti, nicméně se s ním lze v literatuře také setkat. Individuální pravděpodobnost je prakticky hlavní a stěžejní hodnota, která zajímá každého jednotlivce z dané populace a proto se její míra vyhodnocuje a jsou pro ni stanoveny limitní meze.

Druhou hodnotou rizika je pak **riziko společenské**. Požadavek na hodnocení tohoto rizika vznikl ze zkušenosti, že populace obvykle hůře snáší, pakliže při jedné vzniklé rizikové situaci zemře více jedinců než jeden. Z historie větších katastrof jako jsou například větší dopravní nehody (námořní, letecké, vlakové atp.), či po přírodních a průmyslových katastrofách (tsunami, zemětřesení, výbuch chemické továrny) aj. je obvykle populace na rozpacích, zda byl proveden dostatek opatření, aby nedošlo k takto rozsáhlým škodám a úmrtím. Po dané katastrofě obvykle přeživší populace volá po zavedení nápravných opatření, aby k podobně rozsáhlým katastrofám již v budoucnu nedocházelo. Zavedení a vyhodnocování společenského rizika je založeno na lidské psychologii, která obvykle hůře vnímá situace, kdy došlo k rozsáhlejšímu úmrtí více osob. Míru společenského rizika je obvykle nezbytné vyhodnocovat v případech, kde se vyskytuje větší množství lidí, kteří mohou být postiženi danou rizikovou událostí (např. sportovní zařízení – stadiony, plavecké bazény, školy atp.). I pro společenská rizika byly většinově přijaty určité mezní hodnoty a tedy i toto riziko dnes podléhá regulaci.

V případě individuálního rizika byly postulovány různé meze, které lze pro populaci považovat za přijatelné. V této oblasti lze rozlišovat dva přístupy a to – De Minimis Risk [109] – a ALARA [107] přístup (tj. As low as reasonably achievable). V případě přístupu De Minimis Risk byla diskutována a stanovena morálně přijatelná spodní mez, pod kterou lze riziko považovat za akceptovatelné, bez nutnosti vynaložení dalších nákladů na jeho redukci. De minimis doporučuje přijmout jako hodnotu spodní hranice zanedbatelného individuálního rizika jako  $10^{-6}$  za rok (tedy pravděpodobnost, že zemře 1 jedinec z milionu za rok). V případě ALARA přístupu je sledován fakt, že činnosti k redukci rizika sebou obvykle přinášejí prohloubení souvisejících a navazujících socioekonomických problémů. Z hlediska regulace je tak vhodné, rizika kvantifikovat a do určité horní hranice tyto považovat za akceptovatelné vzhledem k vynaloženým nákladů a získaným přínosům. ALARA přístup tak doporučuje stanovit i horní mez, do které lze riziko považovat za ještě akceptovatelné. ALARA přístup dále přebírá i De minimis přístup a doporučuje tak pracovat s dvěma mezemi, tj. horní *U* a spodní *L*. Hodnota individuálního rizika *IR* jakékoli činnosti pak může spadat do jedné z oblastí

- 1.  $IR \ge U$ ; riziko je neakceptovatelné a musí být provedeny kroky k jeho odstranění bez ohledu na vynaložené prostředky.
- 2.  $L \leq IR < U$ ; riziko spadá do ALARA oblasti. Je doporučeno provést analýzu nákladů a přínosů pro případné snížení rizika.
- 3. IR < L; riziko lze považovat za zanedbatelné, není potřeba provádět nápravná opatření.

Samotné hodnoty obou uvedených mezí byly hojně diskutovány různými autory [107], [109]. Je nezbytné si uvědomit, že velikost zanedbatelného, ale i akceptovatelného rizika je zapotřebí chápat také v souvislosti s velikostí populace, která je tomuto riziku vystavena. Pakliže by pak například celá populace USA čítající v roce 1987 přibližně 236 miliónu obyvatel byla vystavena přidanému riziku 10<sup>-6</sup>, tak lze předpokládat, že krom úmrtí na ostatní příčiny přibude za rok 236 úmrtí v důsledku tohoto přidaného rizika. V případě malé populace např. 10 tisíc obyvatel pak stejné riziko pravděpodobně nevyústí v žádné úmrtí v dané populaci za rok [107].

Za relativně ideální míru *IR* lze chápat hodnotu  $10^{-6}$  celoživotně (tj. např. za 70 let) [114]. S ohledem na uvedenou velikost populace USA pak takovéto riziko na celé populaci znamená vzrůst celkového počtu úmrtí o 3.4 osoby za rok. Jiným pohledem na úroveň zanedbatelného rizika může být například pak pohled následující. Pakliže současná míra průměrného individuálního rizika úmrtí na všechny příčiny je přibližně 0.01 za rok (1/97 podle Tab. 6-4) pak další navýšení tohoto rizika o nedobrovolné riziko řádu  $10^{-6}$  vyústí v nové celkové riziko 0.010001 za rok. Při výpočtu porovnání uvedeného nového rizika s původním pak lze získat procentuální nárůst pravděpodobnosti úmrtí o přibližně jen jednu setinu procenta na poměr 1.000097 ku 97 podle výpočtu ( 6-2 ). Jak bylo zmíněno, tak uvedenou hodnotu je vhodné také vnímat v souvislosti s velikostí populace, která je danému riziku vystavena. Pakliže tedy celková populace 236 miliónů by byla vystavena předchozímu a novému riziku, vzroste počet úmrtí z přibližných 2 432 990 na 2 433 226 úmrtí, tj. o již dříve uvedených 236 úmrtí což se může jevit jako relativně vysoké číslo, nicméně vzhledem k velikosti populace a počtu úmrtí za rok se o příliš velký nárůst nejedná. Uvedená míra individuálního rizika  $10^{-6}$  za rok, pak je v současnosti rozeznávána jako spodní mez *L* tolerovatelného rizika a je také v souladu s De minimis přístupem [107].

$$dIR = \frac{IR_{new} - IR_{old}}{IR_{old}} \cdot 100\% = \frac{0.010001 - 0.01}{0.01} \cdot 100\% = 0.01\%$$
(6-2)

Poněkud obtížnější je situace v případě horní mezi tolerovatelného rizika *U*. Obvyklá míra rizika při výkonu nejrizikovějších povolání může dosahovat přibližně řádů 10<sup>-4</sup> až 10<sup>-3</sup> za rok [107]. Hranice 10<sup>-4</sup> pak byla přijata ve většině literatuře za horní mez. Obdobným způsobem jako pro spodní mez je možné pro toto riziko stanovit, že pro průměrného jedince toto znamená nárůst pravděpodobnosti jeho úmrtí v důsledku všech příčin a dané přidané příčiny o přibližně až 1 % na nový poměr 1.0097 ku 97. Tato horní mez se již jeví jako relativně významná a mohla by být diskutabilní, nicméně její užití lze považovat za v současné době všeobecně akceptované [35], [36], [37], [107]. V případě tohoto rizika je pak obvykle předpokládáno, že takto velkému riziku není vystavena větší část populace, neboť v tomto případě by již nárůst úmrtí byl značný. Toto lze ukázat opět na příkladě uvedené populace 236 miliónů lidí. V případě, že by riziko stouplo na 1.0097 ku 97 pak tomu odpovídá roční nárůst úmrtí z předchozích 2 432 990 na 2 456 590 osob, což je nárůst o 23 600 úmrtí za rok, tedy přibližně o uvedené 1 %.

V kapitole 2 Tab. 2-1 tohoto dokumentu byly prezentovány doporučované míry individuálního rizika Carmanem pro použití při návrhu uzemňovacích soustav. Carmanem navrhované limitní hodnoty rizika  $L \sim 10^{-6}$  a  $U \sim 10^{-4}$  celoživotně pak byly podle dalších studií ještě dále zvýšeny na  $L \sim 10^{-6}$  a  $U \sim 10^{-4}$  Tab. 2-2 za rok a tyto hodnoty jsou přijaty v dnes platných dokumentech jako je EG-0 [37] či příloha standardu BS EN 50522 [35]. (*pozn. riziku 10<sup>-6</sup> za rok odpovídá pro porovnání při předpokladu nezávislosti rizika meziročně při průměrném věku dožití 70 let riziko 7*•10<sup>-5</sup> celoživotně)

V případě společenského rizika je stanovení mezí poněkud obtížnější. Jak bylo dříve zmíněno, tak společnost hůř vnímá události s vícenásobným úmrtím osob. V případě tohoto rizika proto byly zavedeny nelineární závislosti pro stanovení spodní a horní meze pro tolerovatelné riziko pro vícenásobné úmrtí. Tyto meze se obvykle zakreslují do tzv. F-N diagramů, kde na ose X je vynesen počet úmrtí *N* a na ose Y je pravděpodobnost *P*, že nastane *N* a více úmrtí. Na základě historických událostí pak bylo stanoveno, že společenský tlak na eliminaci tohoto rizika sleduje např. přibližně nelineární závislost  $P \sim N^{-1.5}$ . Příklad F-N křivek přijatých v australském standardu je vyobrazen na Obr. 6-2 spolu s vypočtenými hodnotami společenského rizika pro danou případovou studii. Z průběhu vypočteného společenského rizika je zřejmé, že v případě daného zemniče je riziko

úmrtí jedné, a dvou a více osob větší než hodnota zanedbatelného rizika (červeně horní mez a zeleně spodní mez ALARA přístupu). V tomto případě by tak bylo zapotřebí provést studii přínosů a nákladů a zhodnotit, zda získané přínosy převyšují nezbytné náklady na eliminaci daného rizika.



Obr. 6-2 Příklad F-N křivek společenského rizika spolu s vynesenými body (černě) společenského rizika úmrtí následky úrazu elektrického proudu při poruše na uzemňovací soustavě (svislá osa Y představuje pravděpodobnost P úmrtí N a více osob), Argon EG-0 [37]

Jelikož v moha případech stačí vyhodnocovat pouze individuální riziko, přičemž lze pak předpokládat naplnění i společenského rizika, tak se tato práce bude dále zabývat pouze stanovováním individuálního rizika. Nicméně jak bylo zmíněno dříve, mohou nastávat případy, kdy společenské riziko dané aktivity může převažovat nad individuálním (činnosti se shlukováním a větší koncentrací lidí) a tak lze vyhodnocení situací a vlivů společenského rizika doporučit pro budoucí navazující výzkum. Je nezbytné zmínit, že z hlediska výpočtu samotného rizika se výpočet, alespoň tak jak je doporučován podle EG-0 [37], liší především ve způsobu výpočtu koincidence, kdy je zapotřebí stanovit, že při dané poruše bude riziku úmrtí současně vystaveno *N* a více osob. Způsob výpočtu této koincidence je uveden v příloze A dokumentu EG-0. Způsob výpočtu pravděpodobnosti fibrilace se pak neliší.

### 6.2 Odpor lidského těla

Souhrnným dokumentem popisujícím elektrické vlastnosti lidského těla lze považovat mezinárodní normu IEC/TS 60479-1:2005 [4]. Tato norma shrnuje dosavadní poznatky o chování lidského těla při přiložení elektrického potenciálu, přičemž především sleduje nízkofrekvenční (50/60 Hz) a DC oblast.

Z hlediska vedení elektrického proudu lze lidské tělo považovat za relativně špatný vodič s odporem v řádu 500  $\Omega$  až několik k $\Omega$ . Charakter lidské impedance lze považovat za převládající resistanční. Odpor lidského těla je závislý na řadě parametrů

- Cesta proudu tělem (ruka-ruka, ruka-noha atp.).
- Velikosti přiloženého potenciálu.
- Délce průtoku proudu tělem.
- Frekvenci protékaného proudu.
- Vlhkosti pokožky.
- Velikosti dotykových ploch s potenciálem a kůží.
- Velikosti přítlaku dotykových a potenciálových ploch.
- Teplotě.

Odpor lidského těla není v lidském těle distribuován rovnoměrně, nýbrž za nejvíce rezistantní lze považovat končetiny (ruky, pak nohy). Odpor trupu těla lze v porovnání s končetinami ve zjednodušujících případech v podstatě zanedbat.

Přestože přesné mechanismy vedení libovolného průběhu proudu lidským tělem jsou mírně komplikovanější, lze zjednodušeně odpor lidského těla složit z odporu pokožky a z vnitřního odporu těla. Impedance pokožky je silně závislá na parametrech uvedených výše. Její hodnota může nabývat i stovek k $\Omega$  pro malé přiložené potenciály. Naopak pro vysoké hodnoty přiloženého potenciálu, či při dlouhotrvajícím působení proudu může dojít k proražení pokožky kdy se její odpor blíží nule a tedy odpor lidského těla je v tomto případě pak tvořen pouze vnitřním odporem těla. Velikost vnitřního odporu těla lze považovat již za relativně stálou hodnotu, závislou především na cestě proudu tělem.

Odpor pokožky, stejně tak jako vnitřní odpor těla, nenabývá pro všechny osoby stejné hodnoty, ale jejich velikosti se v populaci mění. Z experimentálních dat lze nalézt relativně dobrou shodu s logaritmicko-normálním rozložením a v některých pracích [24], [25], [37], [115] pak byl odpor lidského těla takto modelován. Napěťově populační závislost velikosti odporu lidského těla byla stanovena provedenými měřeními jak na zvířatech, tak i na lidech. Nejnovější měření [4], provedená pro krátké působení proudu okolo 25 ms do velikosti napětí 200 V AC, byla provedena na několika živých osobách. Pro vyšší hodnoty napětí byla měření provedena na tělech zesnulých osob. Tato měření byla provedena pro různé podmínky dotyku, kterými byly dotyk za sucha, dotyk mokré kůže a dotyk mokré kůže od přibližně mořské vody (3 % soli) a dále byly měněny velikosti dotykových ploch jako velká 10 000 mm<sup>2</sup>, střední - 1000 mm<sup>2</sup> a malá - 100 mm<sup>2</sup>. Výsledky z těchto měření byly statisticky zpracovány a pro tyto různé případy dotyku byly stanoveny procentní percentily (pravděpodobnosti) s jakou se tyto hodnoty vyskytují v populaci (např. v 5 % případů je odpor lidského těla menší jak určitá hodnota atp.). Velikosti odporů lidského těla jsou podle hodnot z normy vyneseny na Obr. 6-3 a Obr. 6-4 pro dráhu proudu ruka-ruka. Pro případ střední a malé dotykové plochy zatím nebyly provedeny měření pro dotyková napětí větší jak 200 V.

Ze změřených průběhů je zřejmé, že odpor lidského těla od určité úrovně napětí (cca 700 V) již není závislý na přiloženém napětí a nabývá prakticky konstantní hodnoty. Tato hodnota odpovídá stavu, kdy dojde k proražení pokožky a odpor lidského těla pak přejde pouze v hodnotu vnitřního odporu těla.

Odpor lidského těla byl změřen pro dráhu proudu ruka-ruka R(H-H). Pokud je dráha proudu odlišná, je nezbytné odpor lidského těla přepočítat. Provedená měření naznačují, že odpor lidského těla pro dráhu jedna ruka obě nohy R(H-BF) dosahuje přibližné 80 % hodnoty odporu ruka-ruka

$$R(H - BF) = 0.8 \cdot R(H - H)$$
 (6-3)

Podle přílohy D uvedené normy byly pro účely této práce odvozeny vztahy umožňující stanovit velikost odporu i pro jiné dráhy proudu tělem, kdy jsou podle postupu v této příloze postupně stanoveny odpory pokožky a vnitřních částí těla různých drah proudu jako

$$R(Hskin)_{V} = \frac{R(H-H)_{V} - R(H-H)_{I}}{2}$$
(6-4)

$$R(H-T)_V = \frac{R(H-H)_I}{2}$$
 (6-5)

$$R(T - F)_V = 0.3 \cdot R(H - H)_I \tag{6-6}$$

$$R(Fskin)_{V} = 0.3 \cdot [R(H - H)_{V} - R(H - H)_{I}]$$
(6-7)

Kde symbol *H* značí jednu ruku, symbol *T* značí trup, symbol *F* značí jednu nohu/chodilo, *Hskin* značí pokožku na ruce a *Fskin* značí pokožku na noze. Dolní indexy značí hodnoty odporu lidského těla pro uvedenou dráhu při - V přiloženém napětí (respektuje napěťovou závislost pokožky) a I při proražení pokožky, tedy pouze část vnitřního odporu těla nezávislou na napětí. Jsou tedy stanoveny čtyři hodnoty

- R(Hskin)<sub>V</sub> odpor pokožky ruky při přiloženém napětí.
- $R(H-T)_V$  odpor vnitřní části ruky při přiloženém napětí.
- $R(T-F)_V$  odpor vnitřní části nohy při přiloženém napětí.
- *R*(*Fskin*)<sub>V</sub> odpor pokožky nohy při přiloženém napětí.



*Obr. 6-3 Velikost odporu lidského těla pro velkou dotykovou plochu 10 000 mm<sup>2</sup> v závislosti na dotykovém napětí vyskytující se v populaci s 5, 50 a 95 % zastoupením a pro různé scénáře dotyku suchý – Dry, mokrý – Wet, mokrý mořská voda – Salt, podle [4]* 

Z takto stanovených hodnot pak v rámci provedených studii v této práci byly stanoveny odpory i pro jiné části těla jako součet odpovídajících částí těla

$$R(LHLF)_{V} = R(Hskin)_{V} + R(H - T)_{V} + R(T - F)_{V} + R(Fskin)_{V}$$
(6-8)

$$R(LHRH)_V = 2 \cdot R(Hskin)_V + 2 \cdot R(H-T)_V \tag{6-9}$$

$$R(LHBF)_{V} = R(Hskin)_{V} + R(H-T)_{V} + \frac{R(T-F)_{V}}{2} + \frac{R(Fskin)_{V}}{2}$$
(6-10)

$$R(BHBF)_{V} = \frac{R(Hskin)_{V} + R(H - T)_{V} + R(T - F)_{V} + R(Fskin)_{V}}{2}$$
(6-11)

$$R(LFRF)_V = 2 \cdot R(T - F)_V + 2 \cdot R(Fskin)_V \qquad (6-12)$$

Kde zkratky udávají dráhu proudu tělem jako

- LHLF levá ruka levá noha (hodnota odporu je stejná i pro dráhy LHRF levá ruka pravá noha, RHLF pravá ruka levá noha, RHRF pravá ruka pravá noha).
- LHRH levá ruka pravá ruka.
- LHBF levá ruka obě nohy (hodnoty odporu jsou stejné i pro dráhu RHBF pravá ruka obě nohy).
- BHBF obě ruce obě nohy.
- LFRF levá noha pravá noha pro kroková napětí.



Obr. 6-4 Velikost odporu lidského těla pro střední 1000 mm<sup>2</sup> (a) a malou 100 mm<sup>2</sup> (b) dotykovou plochu v závislosti na dotykovém napětí vyskytující se v populaci s 5, 50 a 95 % zastoupením a pro různé scénáře dotyku suchý – Dry, mokrý – Wet, mokrý mořská voda – Salt, podle [4]

Jak bylo řečeno dříve, tak odpor lidského těla nabývá přibližně logaritmicko-normálního rozdělení v populaci. Toto je zapotřebí chápat tak, že z odporů pro 5 a 95 % populace (nebo i 50) lze pro danou hodnotu napětí sestrojit jemu odpovídající pravděpodobnostní rozdělení. Hodnoty odporu pro 5, 50 a 95 % populace jsou v tomto kontextu chápány jako kumulativní hodnoty a tedy odpovídají hodnotám distribuční funkce tohoto rozdělení. Pro stanovení i jiných hodnot tohoto

rozdělení je zapotřebí vypočítat odpovídající velikosti střední hodnoty  $\mu$  a rozptylu  $\sigma$  pro vztah hustoty pravděpodobnosti podle následujícího vztahu

$$fx(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$
(6-13)

Logaritmicko-normální rozdělení se oproti normálnímu rozdělení veličiny X liší pouze tím, že jeho přirozený logaritmus veličiny X má normální rozdělení. Jelikož vztah pro výpočet hustoty pravděpodobnosti i distribuční funkci jak logaritmicko-normálního, tak i normálního rozdělení není přímo analyticky jednoduše řešitelný, převádí se řešení normálního rozdělení na řešení úlohy s jednotkovým normálním rozdělením tzv. U-rozdělení [31], [116], pro které existují tabulky již vypočtených hodnot distribuční funkce. Pak ze znalosti hodnoty odporů, jejich kumulativních/distribučních funkcí lze odvodit vzájemný vztah mezi hodnotami logaritmicko-normálního a U-rozdělení jako

$$P(X \le R_{HB}(V)) = P\left(\frac{X-\mu}{\sigma} \le \frac{\ln(R_{HB}(V))-\mu}{\sigma}\right) = P(U \le u) = P\left(U \le \frac{\ln(R_{HB}(V))-\mu}{\sigma}\right) \quad (6-14)$$

Z řešení pravé částí předchozí rovnice spolu se znalostí hodnot hustoty U-rozdělení pro 5 a 95 % jako  $\phi_{A/B\%} = -1.64$  a +1.64 [116] pak lze řešením soustavy dvou rovnic o dvou neznámých získat velikost střední hodnoty a rozptylu pro logaritmicko-normální rozdělení odporu lidského těla v populaci pro danou hodnotu přiloženého napětí V jako

$$\mu(V) = \frac{\phi_{B\%} \cdot \ln R_{HB}(V, A\%) - \phi_{A\%} \cdot \ln R_{HB}(V, B\%)}{\phi_{B\%} - \phi_{A\%}}$$
(6-15)

$$\sigma(V) = \frac{\ln R_{HB}(V, A\%) - \mu}{\phi_{A\%}}$$
(6-16)

$$plat(P(X \le A\%) < P(X \le B\%)$$
 (6-17)

$$\phi_{A\%} = -1.64; \phi_{B\%} = 1.64; R_{HB}(V, A\%) = R_{HB}(V, 5\%); R_{HB}(V, B\%) = R_{HB}(V, 95\%) \quad (6-18)$$

kde indexy A% a B% značí, které pravděpodobnostní hodnoty jsou přiřazeny. Hodnoty distribuční funkce jsou pak získány jako numerický integrál vztahu hustoty pravděpodobnosti (6-13). Tímto způsobem lze získat hodnoty odporu lidského těla i pro jiné procentní zastoupení v populaci. Příklad sestrojené plochy kumulativní/distribuční funkce pro různé hodnoty odporů lidského těla a různé dotykové napětí je vyobrazen na Obr. 6-5 a Obr. 6-6.

Takto získané rozložení odporu lidského těla v populaci je možné použít pro pravděpodobnostní návrh zemniče [37], [115]. Problémem užití této plochy rozložení je ovšem její jediné reálné využití prostřednictvím metody Monte Carlo. To je v důsledku toho, že při řešení úlohy výpočtu proudu tělem (nezbytného pro stanovení fibrilace srdce, viz. kapitola 6.3) tento není dopředu znám, stejně tak jako odpor lidského těla. Obvykle je uvažováno, že je známo neměnné předpokládané dotykové napětí  $U_{\rm VTp}$ . V případě, že do výpočtu nejsou zahrnuty další přídavné impedance (obuv  $R_{\rm F1}$ , kontakt se zemní  $R_{\rm F2}$  ( 6-20 )), tak prakticky stačí vybrat příslušné rozložení odporu lidského těla pro dané předpokládané napětí a následně provést statistický výpočet metodou Monte Carlo pro různě velké hodnoty odporu lidského těla. Situace ovšem začne být problematická v případě, že jsou do výpočtu zahrnuty další přídavné impedance, např. podle Obr. 6-7 a ( 6-19 ) a ( 6-20 ). Situace bez přídavných impedancí je relativně extrémní situací, neboť předpokládá dokonalý styk chodidel se zemí, což není příliš obvyklá situace a je tedy mnohem pravděpodobnější, že při dotyku bude proud tělem omezen i těmito přídavnými impedancemi. Stavu bez přídavné impedance by se mohla podobat situace např. v okolí bazénu aj. Nicméně v této situaci je problematika složitější, neboť je známo jen předpokládané dotykové napětí na sériové kombinaci odporu lidského těla a přídavných impedancí a nikoli jeho část na samotném těle. Tím tedy dopředu není znám ani odpor těla a k němu ani procházejí proud tělem.



Obr. 6-5 Průběh rozložení velikosti odporu lidského těla v populaci pro velkou a suchou plochu dotyku – distribuční funkce



Obr. 6-6 Průběh rozložení velikosti odporu lidského těla v populaci pro velkou mokrou plochu dotyku se solí – distribuční funkce



*Obr.* 6-7 Příklad elektrického schématu obvodu při dotykovém napětí, upraveno z EN 50522 [2],  $U_{vTp}$  předpokládané dotykové napětí,  $R_T$  odpor lidského těla a  $R_{F1}$  a  $R_{F2}$  přídavné odpory

Tato situace je relativně obtížně řešitelná, neboť i při zvolení nějaké počáteční hodnoty odporu lidského těla např. odpovídající plnému předpokládanému napětí  $U_{vTp}$ , je následně nezbytné zpětným dopočtem stanovit, zda je pro získaný proud tělem splněný napěťový Kirchhoffův zákon podle (6-19). Pakliže by byl zaveden předpoklad, že odpor lidského těla se v populaci nemění, tj. např. při uvážení křivky pro 50 % populace, lze tuto situaci s přídavnými impedancemi v důsledku hladkého konvexního průběhu křivky odporu lidského těla řešit jednoduchou iterační metodou, kdy je nalezena odpovídající hodnota odporu lidského těla splňující požadovanou napěťovou podmínku, viz. Obr. 6-8. Toto ovšem nelze využít v případě, že je zahnuta i populační závislost velikosti odporu, neboť pak dochází k obtížnějšímu pohybu po ploše rozložení podle Obr. 6-9. Na uvedeném obrázku je vykreslena křivka  $Z_{body}$ , která vyznačuje hodnoty odporu lidského těla při zahrnutí jak napěťové závislosti, tak i populační závislosti. Z průběhu této křivky je zřejmé, že tato nekopíruje křivku s konstantním dotykovým napětím [115]. Řešení této situace skrze použití váhované metody Monte Carlo navrhli výzkumníci Griffiths a Woodhouse v časopiseckém příspěvku [115].

$$U_{\nu Tp} = I_B \cdot \left( R_T (U_{Tp}) + R_{F1} + R_{F2} \right)$$
 (6-19)

$$R_{F1} = 1.5 \cdot \rho \tag{6-20}$$

Pro stanovení vlivu vhodnosti modelování odporu lidského těla jeho modelováním pouze s použitím střední hodnoty pro 50 % populace v porovnání s využitím váhované metody Monte Carlo byla provedena analýza porovnání sestrojených skriptů v porovnání s výsledky s nástrojem Argonium [39]. Výsledky této analýzy jsou uvedeny v podkapitole 6.4.2.

V rámci reprodukovaného/sestrojeného výpočtu rizika zemničů byl v rámci této práce odpor lidského těla dále modelován jako populačně konstantní hodnota závislá pouze na přiloženém napětí. Byly tedy primárně využity křivky pro 50 % populace pro různé dotykové scénáře spolu s použitím jednoduché iterační metody podle Obr. 6-8 pro případy s přídavnou izolací.



*Obr.* 6-8 Průběh odporu lidského těla pro 50 % populace pro velkou a suchou plochu dotyku, s naznačením iterační metody pro nalezení odporu lidského těla splňující napěťový Kirchhoffův zákon při přídavných impedancích, V<sub>it</sub> je počáteční odhad dotykového napětí a V<sub>t</sub> je část dotykového napětí na osobě



*Obr.* 6-9 Křivka odporu lidského těla Z<sub>body</sub> při zahrnutí napěťové i populační závislosti v obvodu s přídavnou izolací [115]

### 6.3 Pravděpodobnost fibrilace

Účinky proudu na člověka jsou především závislé na

- Velikosti proudu.
- Délce průtoku proudu.
- Dráze průtoku proudu.
- Frekvenci protékaného proudu.
- Velikosti přiloženého potenciálu.
- Zdravotním stavu postiženého jedince.

Z hlediska vnímání účinků proudu protékajícího člověkem se může jednat o mírné brnění, přes silné svalové kontrakce a popáleniny až po zástavu dechu a vznik fibrilace srdce. Účinky tak mohou být od relativně mírných až po neslučitelné se životem. Z hlediska ochrany před úrazem elektrickým proudem je podle současných standardů [2] počítáno se zabráněním nejhorších následků, jakým je úmrtí postižené osoby v důsledku vzniku fibrilace. Je vhodné zmínit, že fibrilace nemusí být jedinou příčinou úmrtí v důsledku úrazu elektrickým proudem, ale k úmrtí může dojít i např. v důsledku kontrakce svalů hrudního koše a znemožnění respiračního reflexu – udušením, v důsledku průtoku proudu oblastí páteře a poškozením důležitých nervových struktur, v důsledku pádu z výšky při úrazu elektrickým proudem ve výškách, v důsledku těžkých vnějších i vnitřních popálenin s následným možným selháním ledvin v důsledku narušení vnitřní homeostázy člověka.

Přestože tedy existuje více mechanismů úmrtí na následky úrazu elektrickým proudem, je v současnosti vyhodnocován a uvažován pouze jeden způsob, a to je následkem srdeční fibrilace. Pro stanovení mezí proudu způsobující fibrilaci tak byla provedena měření na zvířatech [4] (psi, ovce, prasata), ze kterých byly stanoveny přibližné meze velikosti protékajícího proudu, u kterého se předpokládá, že již může způsobit srdeční fibrilaci. Jelikož nelze provádět testování mezí proudu způsobujícího fibrilaci na člověku, byly při stanovování mezí platných pro člověka zahrnuty do vyhodnocení pouze historické záznamy o proběhlých fatálních úrazech. Z porovnání těchto historických události s výsledky na zvířatech se jeví, že výsledky u testovaných zvířat relativně dobře korespondují s hodnotami pro člověka. Z těchto výsledků tak byly sestrojeny křivky proudově časových závislostí udávající meze, že u člověka dojde k srdeční fibrilaci. Tyto meze jsou známy jako tzv. c-křivky (cl až c4) a společně s dalšími závěry jsou shrnuty v mezinárodní normě IEC TS 60479-1:2005 [4]. Tyto křivky jsou v tomto dokumentu vyobrazeny na Obr. 2-1.

Je vhodné zmínit, že stanovení křivek bylo provedeno tak, že pro krátké doby působení proudu 10-100 ms může k fibrilaci dojít pro proudy větší jak přibližně 500 mA. V případě dlouhých dob působení proudu delších jak přibližně 1-3 s pak k fibrilacím dochází pro proudy větší jak přibližně 50 mA. Tyto dvě meze byly posléze empiricky propojeny, kdy při vyobrazení těchto křivek v logaritmickém měřítku vznikl charakteristický S-tvar těchto křivek. Z hlubšího zkoumání původních prací Biegelmeiera [5] a dalších se pak jeví [11], že při zavedení těchto c-křivek do standardu bylo přijato další navýšení bezpečnosti, neboť normou udávaným mezím 50 a 500 mA původně odpovídaly proudy větší a to přibližně 80 a 2000 mA.

Při provedených měřeních bylo zjištěno, že fibrilace srdce nenastává pro stejnou hodnotu protékaného proudu a délku působení ve všech případech, ale jen v určitém procentu případů. Byly tak celkem sestrojeny 4 křivky c1 až c4, které postupně definují

- c4 mez proudu, při které dochází k fibrilaci v 95 % případů.
- c3 mez proudu, při které dochází k fibrilaci v 50 % případů.
- c2 mez proudu, při které dochází k fibrilaci v 5 % případů.
- c1 mez proudu pod kterou se fibrilace vyskytuje jen velice zřídka (uváděné procento případů je přibližně 0.1 %).

Statistickým vyhodnocením těchto křivek, bylo zjištěno, že pravděpodobnostnímu rozložení fibrilace při konstantní délce působení proudu odpovídá přibližně logaritmicko-normální rozdělení. Křivky c1 až c4 odpovídají kumulovaným hodnotám distribuční funkce pravděpodobnosti a tedy obdobně jako v případě odporu lidského těla, lze sestrojit celou plochu rozložení pravděpodobnosti fibrilace v závislosti na velikosti protékaného proudu a době jeho působení. Originální obrázek s c-křivkami z normy spolu s naznačením průběhu distribuční funkce rozložení pravděpodobnosti

fibrilace je vyobrazen na Obr. 6-10 (a) a způsob proložení křivek c1 až c4 pro získání plochy rozložení je naznačen na obrázku Obr. 6-10 (b). Parametry logaritmicko-normálních rozložení lze získat způsobem obdobným jako v případě odporu lidského těla. Pro logaritmicko-normální rozdělení lze zapsat funkci hustoty pravděpodobnosti podle (6-13). Pak obdobně jako ve vztazích (6-14) až (6-18) lze získat střední hodnotu a rozptyl hustoty pravděpodobnosti fibrilace jako

$$P(X \le I_{HB}(t)) = P\left(\frac{X-\mu}{\sigma} \le \frac{\ln(I_{HB}(t))-\mu}{\sigma}\right) = P(U \le u) = P\left(U \le \frac{\ln(I_{HB}(t))-\mu}{\sigma}\right) \quad (6-21)$$

$$\mu(t) = \frac{\phi_{B\%} \cdot \ln I_{HB}(t, A\%) - \phi_{A\%} \cdot \ln I_{HB}(t, B\%)}{\phi_{B\%} - \phi_{A\%}}$$
(6-22)

$$\sigma(t) = \frac{\ln I_{HB}(t, A\%) - \mu}{\phi_{A\%}}$$
 (6-23)

$$P(X \le A\%) < P(X \le B\%)$$
 (6-24)

Pro sestrojení plochy pravděpodobnosti pak lze využít libovolnou kombinaci dvou křivek *c* a tyto proložit rozložením. Logicky správným řešením by bylo vyjít z křivek *c1* a *c4*, nicméně například podle [11] či [37], potažmo Argonium [39] bylo použito křivek *c2* a c3, či *c4*. V této práci byl zkoumán vliv volby těchto křivek v porovnání s programem Argonium a výsledky jsou uvedeny v podkapitole 6.4.2. Do vztahů ( 6-22 ) a ( 6-23 ) pro různou kombinaci c-křivek je nezbytné dosadit hodnoty odpovídající daným kumulativním hodnotám. Tyto hodnoty spolu s požadovanými křivkami jsou uvedeny v Tab. 6-5.

Tab. 6-5 Parametry plochy rozložení pravděpodobnosti fibrilace pro různou kombinaci c-křivek

Číslo	Kombinace	$\phi_{ m A\%}$	$\phi_{ m B\%}$	$I_{\mathrm{HB}}(t,A\%)$	$I_{\rm HB}(t,B\%)$
1	c1-c2	-3	-1.64	$I_{\rm HB}(t,c1)$	$I_{\rm HB}(t,c2)$
2	c1-c3	-3	0	$I_{\rm HB}(t,c1)$	$I_{\rm HB}(t,c3)$
3	c1-c4	-3	1.64	$I_{\rm HB}(t,c1)$	$I_{\rm HB}(t,c4)$
4	c2-c3	-1.64	0	$I_{\rm HB}(t,c2)$	$I_{\rm HB}(t,c3)$
5	c2-c4	-1.64	1.64	$I_{\rm HB}(t,c2)$	$I_{\rm HB}(t,c4)$
6	c3-c4*	0	1.64	$I_{\rm HB}(t,c\beta)$	$I_{\rm HB}(t,c4)$

\*pro (6-23) musí být jmenovatel různý od nuly, pro tuto kombinaci je zapotřebí provést opačnou substituci při řešení dvou rovnic o dvou neznámých, řešením lze získat úplně stejné vztahy jako (6-22) a (6-23), akorát jsou prohozeny všechny indexy A za B a B za A.



*Obr.* 6-10 Proudově časové c-křivky pro pravděpodobnost fibrilace podle IEC TS 60479-1:2005 (a), (b) naznačení způsobu získaní plochy rozložení pravděpodobnosti fibrilace – naznačena distribuční funkce pro velikost proudu tělem při konstantním čase 200 ms, rozložení podle [11]

Na Obr. 6-11 je pak vynesena sestrojená plocha rozložení pravděpodobnosti fibrilace. Takto sestrojenou plochu fibrilace použili při pravděpodobnostním vyhodnocování zemničů právě také Dimopoulos [11] či australský přístup podle EG-0 [37] a byl použit také v programu Argon a Argonium [38], [39]. Distribuční funkce tohoto rozdělení spolu s funkcí hustoty pravděpodobnosti byly v tomto dokumentu vyobrazeny z jiného úhlu pohledu také na Obr. 2-7 a Obr. 2-8.

Hodnoty proudu způsobující fibrilaci uvedené v normě a zde vyobrazená na Obr. 2-1, Obr. 2-7, Obr. 2-8, Obr. 6-10 a Obr. 6-11 jsou pro dráhu proudu levá ruka obě nohy. Pro případ odlišné dráhy proudu je zapotřebí velikost proudu přepočíst tak, aby odpovídal ekvivalentnímu proudu dráhy levá ruka-obě nohy. Norma IEC TS 60479-1 udává pro tento přepočet následující vztah

$$I_{HB}(LHBF)_{TouchCase} = F \cdot I_{HB}(TC)$$
 (6-25)

Kde  $I_{\text{HB}}(TC)$  je proud spočtený pro daný skutečný dotykový scénář a  $I_{\text{HB}}(LHBF)$  je jemu odpovídající ekvivalentní proud pro dráhu levá ruka obě nohy tak, aby mohl být využit pro stanovení pravděpodobnosti fibrilace podle plochy rozložení. Hodnoty koeficientu *F* jsou pak pro různé dráhy proudu uvedeny v normě, viz zde Tab. 6-6.



Obr. 6-11 Plocha rozložení pravděpodobnosti fibrilace v závislosti na protékaném proudu a době jeho působení, naznačení tvorby podle dat z IEC TS 60479-1

Tab.	. 6-6	Velikosi	t koeficientu	F pro	přepočet	proudu	pro j	inou	dráhu	tělem	než i	levá	ruka	obě
nohy	y, pod	dle [4]												

Dráha proudu	Koeficient F (-)
Levá ruka – levá noha, pravá noha nebo obě nohy (LHLF, LHRF, LHBF)	1.0
Obě ruky obě nohy (BHBF)	1.0
Levá ruka pravá ruka (LHRH)	0.4
Pravá ruka – levá noha, pravá noha nebo obě nohy (RHLF, RHRF, RHBF)	0.8
Levá noha pravá noha (LFRF)	0.04
Záda – pravá ruka	0.3
Záda – levá ruka	0.7
Hruď – pravá ruka	1.3
Hruď – levá ruka	1.5

Symboly uvedené v tabulce Tab. 6-6 L, R, B, H, F značí

- L left levá
- *R* right pravá
- B both obě
- H hand ruka
- F foot/feet noha, nohy

Uvedené značení drah proudu tělem pro různé dotykové scénáře LHBF, RHLF atp. je použito i dále v tomto dokumentu.

## 6.4 Autorem reprodukovaný přístup

Pro provedení analýzy užití této metody v rámci distribuční sítě byly vytvořeny skripty v prostředí Matlabu [84] označované dále jako *Erisk*, které umožňují výpočet jednotlivých dílčích kroků. Postupu výpočtu pravděpodobnosti fibrilace tedy probíhá následovně:

- Z normy IEC TS 60479-1 byly přepsány hodnoty odporu lidského těla do datových dokumentů pro všechny typy dotyku (velká, střední, malá plocha, suchý, mokrý, slaná voda). Dále graf vyobrazující c-křivky udávající pravděpodobnost fibrilace, podle Obr. 6-10 (a) byl pomocí webového nástroje [106] digitalizován a byly tak odečteny hodnoty vyobrazených c křivek. Pro získání křivky pro 95 % populace byl využit graf Obr. 2-1 podle příspěvku [11].
- Průběhy odporu lidského těla, stejně tak jako c-křivky byly proloženy pomocí programu Matlab tak, aby bylo možné vypočíst hodnoty těchto křivek i mimo vyčtené/digitalizované body.
- 3. Pro vybraný pár c-křivek byly stanoveny střední hodnoty  $\mu$  a rozptyly  $\sigma$  rozložení podle (6-22), (6-23) s krokem 1 ms po daných c-křivkách. Celkem tak bylo vypočteno cca 9990 středních hodnot  $\mu$  a rozptylu  $\sigma$  pro daný pár c-křivek.
- 4. Pro požadovanou hodnotou předpokládaného dotykového napětí je z proložených hodnot křivky odporu lidského těla pro 50 % populace podle bodu 2 vypočtena počáteční hodnota odporu lidského těla. V případě dráhy proudu odlišné od ruka-ruka je tato hodnota dále přepočtena podle postupu popsaném v podkapitole 6.2 podle vztahů (6-8) až (6-12) pro tuto odlišnou dráhu proudu. Pokud je dotykové napětí větší nebo menší jak horní nebo spodní mez napětí, pro které byly odpory lidského těla změřeny, jsou v dalším výpočtu použity okrajové změřené hodnoty. Křivky odporu lidského těla tedy nebyly extrapolovány.
- 5. V případě, že se jedná o dotyk s přídavnými impedancemi je implementována jednoduchá iterační metoda, která ověřuje splnění napěťového Kirchhoffova zákona v obvodu sériové kombinace odporu lidského těla a přídavných impedancí podle Obr. 6-7, Obr. 6-8 a (6-19). Iterační metodou je stanoven odpor lidského těla takový, kdy úbytek napětí na celé sériové kombinaci odporů ve dvou po sobě následujících iteracích se liší od napětí zdroje (předpokládaného dotykového napětí) o maximálně 0.1 V. Tato iterační metoda konverguje relativně rychle a jejím výsledkem je pak vypočtená velikost odporu člověka pro dané předpokládané dotykové napětí.
- 6. Ze známého odporu lidského těla, přídavných impedancí a předpokládaného dotykového napětí je stanovena velikost proudu tělem *I*<sub>HB</sub>.
- 7. Pro požadovanou délku trvání průchodu proudu *t*, zaokrouhlenou na celé ms, je následně vybrána odpovídající střední hodnota  $\mu_t$  a rozptyl  $\sigma_t$ , pro které je pro proud  $I_{\text{HB}}$  vypočtena

hodnota distribuční funkce jako numerický integrál funkce hustoty pravděpodobnosti podle (6-13) s krokem po 1 mA. Vypočtená hodnota kumulativní distribuční funkce odpovídá výsledné hodnotě pravděpodobnosti pro požadovaný dotykový scénář. Pokud se jedná o dráhu proudu jinou než LHBF, je proud  $I_{\rm HB}$  přepočten koeficientem F podle Tab. 6-6. Pokud je čas působení proudu větší nebo menší než meze udávané c-křivkami (10 a 10 000 ms), je pro tyto časy použito právě těchto okrajových rozložení s hodnotami  $\mu_{10ms}, \mu_{10000ms}, \sigma_{10ms}, \sigma_{10000ms}$ .

Uvedeným způsobem je možné stanovit pravděpodobnost fibrilace při změně

- Použité křivky odporů lidského těla 5, 50, 95 % populace.
- Velikosti dotykové plochy velká, střední, malá.
- Podmínkách dotyku suchý, mokrý, slaná voda.
- Různou dráhu tělem ruka-ruka, ruka-noha, ruka-obě nohy atp.
- Pro scénář s přídavnými odpory obuvi, odpor kontaktu chodidla se zemí.
- Pro libovolnou velikost proudu tělem.
- Pro libovolnou velikost času průchodu proudu tělem.
- Pro vybranou libovolnou kombinaci použitých c-křivek pro sestrojení plochy rozložení pravděpodobnosti fibrilace.

S využitím takto sestrojených skriptů byla provedena analýza obměn některých z uvedených parametrů. Např. v případě použité plochy dotyku je nezbytné zmínit, že v těchto případech dochází ke značnému nárůstu odporu lidského těla a tedy z uvedených tří možností je nejnebezpečnější velká dotyková plocha. Dalším problémem je stanovení těchto odporů těla normou jen po velikost dotykového napětí do 200 V, což je z hlediska požadovaných výpočtů nedostatečné. Ačkoli skripty umožňují tento parametr měnit, jeho vliv na výsledky nebyl do analýz zahrnut a všechny analýzy byly provedeny pouze pro velké dotykové plochy.

Z hlediska suchého a mokrého kontaktu je zřejmé, že tento parametr má značný vliv na velikost odporu lidského těla v oblasti nízkých napětí. Nejhorším případem zde je dotyk za přítomnosti slané vody. Vliv tohoto parametru nebyl explicitně zkoumán, nicméně byly uváženy mokré a suché dotyky v rámci provedené citlivostní analýzy případové studie aplikace pravděpodobnostního přístupu na zemnič v distribuční soustavě.

V rámci uvedené citlivostní analýzy byly taktéž uváženy dotykové scénáře s různou dráhou proudu tělem. Vliv obuvi byl zkoumán pouze přidanou konstantní hodnotou odporu obuvi. V případě zemního odporu přestupu proudu z chodidla do země pak byl tento vliv modelován pomocí známe formule (6-20). Vliv tohoto odporu tak v podstatě přechází na vliv velkosti rezistivity půdy. Všechny tyto uvedené parametry – různá dráha proudu tělem, přídavná izolace a zemní odpor chodidla pak byly různě zkoumány v rámci provedené citlivostní analýze uvedené v následujících samostatných kapitolách.

Jedním z nedostatků reprodukovaného přístupu je pak modelování odporu lidského těla pouze prostou hodnotou. Jak bylo naznačeno v podkapitole 6.2, tak odpor lidského těla lze modelovat celou plochou rozložení. V následující podkapitole 6.4.2 je provedena analýza tohoto zjednodušení s naznačenými závěry a doporučeními vycházející z porovnání výsledků z programu Argonium [39] a skriptů Erisk. Pro potřeby provedení tohoto porovnání a dále také pro naznačení připouštěné míry rizika dnešních křivek dotykových napětí je nejprve provedena analýza pravděpodobností fibrilace současných křivek dovolených dotykových napětí v podkapitole 6.4.1 na kterou následně naváže analýza způsobu modelování odporu lidského těla.

#### 6.4.1 Připouštěná míra rizika současných křivek dovolených dotykových napětí

Jak bylo zmíněno v úvodu této kapitoly 6, tak přibližná očekávatelná velikost pravděpodobnosti fibrilace odvozených křivek dovolených dotykových napětí Obr. 6-1 podle normy EN 50522 [2] lze předpokládat přibližně 5 %. Nicméně v důsledku váhování různých dotykových scénářů a využití pouze velikosti odporu lidského těla pro 50 % populace, se lze domnívat, že skutečná velikost pravděpodobnosti fibrilace těchto křivek může být odlišná.

Křivky dovolených dotykových napětí představují závislost velikosti dotykového napětí na délce působení tohoto napětí. V normě je odvozeno celkem 5 křivek pro různé dotykové scénáře

- 1. Dotek bez přídavných impedancí.
- 2. Dotek bez bot s povrchovou rezistivitou půdy 500  $\Omega$ m.
- 3. Dotek s botami 1000  $\Omega$  a s povrchovou rezistivitou půdy 500  $\Omega$ m.
- 4. Dotek s botami 1000  $\Omega$  a s povrchovou rezistivitou půdy 1000  $\Omega$ m.
- 5. Dotek s botami 1000  $\Omega$  a s povrchovou rezistivitou půdy 2000  $\Omega$ m.

Všechny křivky byly odvozeny pro dotykový scénář s velkou suchou plochou dotyku a ač norma není v definici uvažované dráhy proudu úplně jednoznačná, tak se lze domnívat, že dotykové scénáře 2-5 jsou nejspíše pro dráhu proudu jedna ruka obě nohy a scénář 1 je váhovaným průměrem více různých drah proudu. Křivky udávají předpokládané dotykové napětí, kdy v případě scénářů s přídavnými rezistancemi se pak jedná o předpokládané dovolené dotykové napětí  $U_{vtp}$  na celé sériové kombinaci odporu lidského těla a přídavných impedancí, viz. Obr. 6-7. Ze znalosti všech uvedených parametrů je pak možné pomocí vytvořených skriptů *Erisk* popsaných v kapitolách 6.2, 6.3 a 6.4 každému bodu napětí  $U_{vtp}(t)$  těchto křivek dopočíst jim odpovídající hodnoty pravděpodobnosti fibrilace pro dané časy působení napětí. Tímto způsobem tak byly stanoveny pravděpodobnosti fibrilace prezentovaných křivek dovoleného dotykového napětí normy EN 50522, jejichž průběhy jsou souhrnně vyobrazeny na Obr. 6-12.

V tomto obrázku jsou vyneseny průběhy pravděpodobnosti fibrilace P<sub>fib</sub> pro všech 5 uvedených křivek/scénářů dotyku v závislosti na době působení napětí. Jelikož v reprodukovaném skriptu byl odpor těla modelován jako prostá hodnota rovná odporu pouze pro 5, 50 nebo 95 % populace, byly pro každou křivku dovolených dotykových napětí stanoveny celkem 3 křivky, které odpovídají stavům, kdy pro výpočet proudu tělem byly použity velikosti odporů lidského těla odpovídající právě těmto třem kumulativním úrovním. Užití těchto tří hodnot odporu lidského těla lze chápat tak, že při skutečném použití křivek dovolených napětí podle normy, projektant dopředu neví, jaký odpor bude mít osoba vystavená této zavedené hodnotě dovoleného dotykového napětí. Může se tak stát, že dovolenému dotykovému napětí bude vystavena osoba s malým odporem spadající do spodních 5 % populace, či osoba s velkým odporem blížícím se horním 5 % všech hodnot v populaci (tj. spadající do intervalu 95 % populace). V uvedeném obrázku je tak možné vidět celý interval hodnot, jakých může nabývat pravděpodobnost fibrilace, pokud jsou při návrhu použity křivky dovolených dotykových napětí. Pro výpočet pravděpodobností fibrilace byla použita dráha proudu levá ruka obě nohy. Z hlediska nabízených scénářů uvažující "běžnou situaci" patří tento k jednomu z nejhorších, kdy horší může být už jen pro dráhu proudu obě ruce obě nohy (pro jiné další situace dotyku např. hruď-záda lze vzhledem k velikosti koeficientu F Tab. 6-6 a velikosti odporu lidského těla předpokládat pravděpodobnost fibrilace ještě větší, nicméně takovýto dotyk lze předpokládat jako silně nepravděpodobný).



*Obr.* 6-12 *Pravděpodobnost fibrilace křivek dovolených dotykových napětí pro dráhu proudu levá* ruka obě nohy

K samotným hodnotám pravděpodobnosti fibrilace pak lze říct, že nabývají hodnot značně větších, než jaké by se daly předpokládat podle textu normy. Průměrná pravděpodobnost fibrilace se pohybuje přibližně okolo 50 %, kdy v případě zahrnutí extrémů pak od 5 až po 90 %. Vyvstává tak tedy otázka, čím může být toto způsobeno. Prvotní možností může být to, že pro stanovení křivek dovolených dotykových napětí (alespoň křivky 1) byl použit váhovaný průměr dovolených dotykových napětí pro 4 různé dotykové scénáře. Tak tedy například použitím odlišné dráhy proudu, s menším nebezpečím fibrilace jako například pravá ruka pravá noha, lze získat mnohem menší velikosti pravděpodobnosti fibrilace než v uvedeném předchozím případě a to přibližně průměrně jen 10 %, podle Obr. 6-13 (obrázek vznikl stejně jako Obr. 6-12 s jediným rozdílem v odlišné proudu tělem).

Další variantou zdroje rozdílu může být samotný způsob interpretace odporu lidského těla jako prosté hodnoty namísto celé plochy rozložení, jak bylo naznačeno v kapitole 6.2. Pro ověření tohoto vlivu byly hodnoty vybraných bodů křivek dovolených dotykových napětí ručně zadány do webového prostředí programu Argonium [39] a byly tak získány velikosti pravděpodobnosti fibrilace i z postupu, který uvažuje s tímto pravděpodobnostním rozdělením odporu lidského těla v populaci.

Vypočtené pravděpodobnosti fibrilace podle skriptů *Erisk* a i získané z prostředí Argonium jsou vyneseny na Obr. 6-14. Hodnoty vypočtené reprodukovanými skripty *Erisk* jsou totožné, jako uvedené na Obr. 6-12 a byly vypočteny pro dráhu proudu levá ruka obě nohy. Z porovnání průběhů

reprodukovanými skripty Erisk a Argonium lze pozorovat relativně dobrou shodu mezi získanými výsledky. Toto je zřejmé především z dotykového scénáře 1 (a), kdy rozdíl ve vypočtené pravděpodobnosti fibrilace je přibližně okolo 20 %, přičemž výpočet podle Erisk dává konzervativnější výsledky. V případě bodů s přídavnou izolací je pak zřejmé, že velikost přídavné izolace nabývá pravděpodobně hodnoty větší než 1000  $\Omega$ , která je použitá v normě a i ve skriptech Erisk. Pakliže by tedy bylo provedeno vyhodnocení pravděpodobnosti fibrilace křivek dovolených dotykových napětí podle výsledků z programu Argonium, tak tyto výsledky naznačují úroveň pravděpodobnosti fibrilace od přibližně 5 do 40 %.



Obr. 6-13 Pravděpodobnost fibrilace křivek dovolených dotykových napětí pro dráhu proudu pravá ruka pravá noha

Pro příklad je provedeno stejné porovnání získaných pravděpodobností fibrilace ze skriptů Erisk s programem Argonium i při uvážení odlišně dráhy proudu RHRF na Obr. 6-15. Je nezbytné zmínit, že v programu Argonium lze rozlišovat pouze tři dotykové scénáře a to ruka – nohy, ruka – ruka a noha – noha. Tedy výsledky z Argonium zůstávají stejné, ovšem výsledky ze skriptů Erisk jsou stanoveny pro tuto jinou dráhu proudu. Z tohoto obrázku je patrné, že použití této prakticky nejpříznivější dráhy proudu RHRF pro spojení mezi rukama a nohama (podle koeficientu F a velikosti odporu těla) vede k poklesu pravděpodobnosti fibrilace pro různé dotykové scénáře o 30-50 %. Z výsledků se pak také jeví, že výsledky pro tuto dráhu proudu se více blíží výsledkům získaným z programu Argonium.


*Obr.* 6-14 Pravděpodobnost fibrilace křivek dovolených dotykových napětí pro různé dotykové scénáře podle sestrojených skriptů Erisk ve srovnání s Argonium, dráha proudu LHBF a křivky c3-c4, (a) scénář 1, (b) scénář 3, (c) scénář 4, (d) scénář 5



*Obr.* 6-15 Pravděpodobnost fibrilace křivek dovolených dotykových napětí pro různé dotykové scénáře podle sestrojených skriptů Erisk a ve srovnání s Argonium, dráha proudu RHRF a křivky c3-c4, (a) scénář 1, (b) scénář 3, (c) scénář 4, (d) scénář 5

Z uvedených výsledků je tak zřejmé, že pravděpodobnost fibrilace křivek dovolených dotykových napětí může být značně proměnná a lze ji předpokládat větší jak 5 %. K výsledkům a rozdílům mezi skripty Erisk a programem Argonium lze říci, že je lze předpokládat v důsledku

- Modelování odporu lidského těla jako prosté hodnoty nebo pomocí rozložení.
- Modelování odporu obuvi jako prosté hodnoty nebo pomocí rozložení.
- Užití různé dráhy proudu tělem.
- A v neposlední řadě, co v uvedeném rozboru nebylo doposud diskutováno, v důsledku různé volby dvou c-křivek podle 6.3 použitých pro sestrojení celé plochy rozložení pravděpodobností fibrilace.

Za tímto účelem byla v následující podkapitole provedena analýza volby různých c-křivek a drah proudu tělem pro analýzu rozdílů mezi sestrojenými výpočtovými skripty Erisk a programem Argonium.

Pozn. 1: Program Argonium byl vyvinut australskou asociací Energy Networks Australia. Tato asociace je taktéž autorem příručky EG-0 [37] a tedy v ní navržené pravděpodobnostní metodiky Vrámci tohoto webového programu byl implementován návrhu zemničů. obdobný pravděpodobností výpočet (Tab. 4-1) umožňující ze zadaných hodnot dotykového napětí, času působení a dalších okolností dotyku stanovit jak pravděpodobnost fibrilace, tak i pravděpodobnost koincidence a celkového výsledného rizika. Z důvodu omezených možností tohoto programu bylo provedeno porovnání pouze pro křivky dovolených dotykových napětí scénářů 1, 3, 4 a 5. V případě scénáře 1 bez přídavných izolací v programu není umožněno nastavit nulovou hodnotu rezistivity půdy a tak byla zvolena nejmenší možná hodnota 5  $\Omega m$ . U této hodnoty lze předpokládat její vliv na výsledky jako minimální. Dále v tomto programu je odpor obuvi modelován pravděpodobnostním rozložením a nikoli jen jako prostou hodnotou. V programu tak lze vybrat ze dvou typů obuvi – Standard a Electrical. Obuv standard je předpokládána jako užívána veřejností, kdežto Electircal jako spíše užívána elektrotechnickými pracovníky uvnitř rozvoden. V příručce EG-0 [37] lze k odporům obuvi použitých pro vygenerování jejich pravděpodobnostního rozložení použitého v prostředí Argonium nalézt nějaké základní informace. Příručka EG-0 uvádí, že pakliže nelze použít pravděpodobnostního rozložení odporu obuvi, lze použít místo obuvi typu Standard jen prosté hodnoty rovné 2 k $\Omega$ . Ač je tedy tato hodnota větší jak uvažovaná hodnota 1 k $\Omega$  u daných dotykových scénářů, tak v důsledku nemožnosti tuto hodnotu nastavit explicitně v prostředí Argonium byly pro dotykové scénáře 3, 4 a 5 s přídavnou izolací vypočteny hodnoty pro obuv jak Standard, tak i Electrical.

Pozn. 2: Pro získání pravděpodobností fibrilace křivek dovolených dotykových napětí podle obrázků Obr. 6-12 až Obr. 6-15 v této kapitole byly použity křivky c3 a c4. Z porovnání výsledků s řešením podle webového prostředí Argonium se volba těchto dvou křivek jeví jako nejvýhodnější s tím, že tyto dvě křivky byly zvoleny také s ohledem na to, že udávají konzervativnější výsledky viz 6.4.2.

# 6.4.2 Srovnání Erisk s programem Argonium a vliv modelování odporu lidského těla a odporu obuvi jako prosté hodnoty

V předchozí podkapitole 6.4.1 byly prezentovány výsledky výpočtu pravděpodobnosti fibrilace křivek dovolených dotykových napětí podle normy EN 50522 [2]. Pravděpodobnosti fibrilace těchto křivek byly v uvedené podkapitole stanoveny jak pomocí sestrojených skriptů Erisk podle 6.4, tak i pomocí velice obdobného nástroje Argonium [39], jehož výpočet je v souladu s postupem EG-0 [37] Tab. 4-1. V případě výsledků stanovených skripty Erisk byly pro sestrojení plochy rozložení pravděpodobnosti fibrilace použity křivky c3 a c4 udávající pravděpodobnost vzniku fibrilace v 50 a 95 % případů. V případě programu Argonium je zjištění přesného postupu při stanovování plochy rozložení pravděpodobností fibrilace poněkud obtížnější [117], neboť dokument EG-0 prakticky neuvádí přesný postup tvorby této plochy, ale uvádí prosté sdělení, že křivky c2, c3 a c4 byly proloženy pro získání této plochy. Z řešení pravé strany rovnice ( 6-21 ) lze při použití různých hodnot kumulativní distribuční funkce získat soustavu následujících dvou rovnic ( 6-26 ) a ( 6-27 ) o dvou neznámých  $\mu$ ,  $\sigma$  pro různou kombinaci použitých křivek A% a B%. Řešením těchto rovnic jsou vztahy ( 6-22 ) a ( 6-23 ) spolu s hodnotami proměnné  $\phi$  jednotkového U-rozdělení uvedenými v Tab. 6-5.

$$\phi_{A\%} = \frac{\ln I_{HB}(t, A\%) - \mu}{\sigma}$$
 (6-26)

$$\phi_{B\%} = \frac{\ln I_{HB}(t, B\%) - \mu}{\sigma}$$
 (6-27)

Toto řešení pomocí soustavy dvou rovnic o dvou neznámých je založeno na předpokladu, že tomuto získanému řešení budou odpovídat i hodnoty zbylých nepoužitých křivek, tj. při řešení tří či čtyř rovnic o dvou neznámých je postup obdobný jako pro pouze dvě rovnice, nicméně po získání řešení je zapotřebí ověřit, zda získanému řešení vyhovují i zbylé nepoužité rovnice. V podkapitole 6.3 a také výše v předchozích podkapitolách bylo předpokládáno, že zbylé nepoužité rovnice získanému řešení vyhovují. To ovšem podle získaných výsledků, uvedených dále, není obecně pravda a tedy nejsprávnějším řešením by bylo stanovit pro kterou kombinaci dvou křivek lze dosáhnout nejmenší chyby pro zbylé nepoužité křivky. Vyvstává zde otázka, jaký přístup tak byl zvolen v případě programu Argonium, potažmo v příručce EG-0. Jelikož ovšem pro výpočet v programu Argonium byly oproti reprodukovanému výpočtu podle skriptů Erisk navíc zahrnuty pravděpodobnostní rozložení odporů lidského těla a obuvi, lze výpočet podle Argonium považovat za lépe modelující skutečné chování více různých parametrů a tak budou tedy výsledky podle programu Argonium pro následující provedené analýzy považovány za referenční. Ať již tedy při tvorbě plochy rozložení podle EG-0 byly použity buď jen 2 křivky, nebo všechny 4, bude ve zbytku této podkapitoly provedena analýza volby pouze dvou křivek pro skripty Erisk takových, aby bylo dosaženo výsledků pokud možno nejbližších či konzervativnějších než v případě programu Argonium.

Motivací provedení této analýzy je fakt, že implementace pravděpodobnostního rozdělení odporů lidského těla do pravděpodobnostního výpočtu fibrilace je relativně komplikovanou záležitostí a tedy zjednodušeným použitím pouze jedné hodnoty odporu lidského těla (např. pro 50 % populace) by bylo možné pravděpodobnostní výpočet fibrilace zjednodušit. Předpokladem této analýzy pak je, že vhodnou volbou c-křivek takovéhoto řešení lze docílit, tedy že modelování odporu lidského těla pravděpodobnostním rozdělením nemá na výsledky až tak značný vliv. Přijetí výsledků podle programu Argonium jako referenčních pro zamýšlené zjednodušení je dále podloženo faktem, že jeho výsledky jsou v současnosti akceptovány jak australskými distribučními společnostmi [118], tak i australskými regulačními orgány prostřednictvím příruček a doporučení australské asociace Energy Networks Australia. Tato asociace sdružuje zástupce distributorů, výrobců a projekčních kanceláří za účelem sjednocení standardizace a pracovních postupů.

Pro analýzu výběru dvou c-křivek pro sestrojení plochy pravděpodobnosti fibrilace je nezbytné provést porovnání mezi výsledky získanými z obou výpočetních programů Erisk a Argonium. Tato porovnání mezi výsledky obou programů byla provedena na sérii 11 křivek průběhu dotykového napětí, kdy tyto křivky byly zvoleny jako násobky křivky předpokládaných dotykových napětí pro scénář dotyku 1 podle EN 50522 (křivka scénáře 1 je vyobrazena na Obr. 6-1). Pro stanovení vlivu jednotlivých parametrů samostatně byla provedena analýza pro tři stavy a to pro případ bez přídavných odporů obuvi a kontaktu se zemí, dále pak pro případ s přítomností obuvi, ale s minimální velikosti odporu kontaktu se zemí a pak pro případ kdy je přítomna jak obuv, tak i velikost odporu kontaktu chodidla se zemí nabývá velké hodnoty v důsledku vysoké hodnoty rezistivity povrchové vrstvy půdy.

Pro nejjednodušší scénář, u kterého se neuplatňuje zemní odpor přechodu proudu z chodidla do země a také se neuplatňuje odpor přídavné izolace obuvi tak bylo vytvořeno 11 křivek, které odpovídají násobkům 0.05, 0.1, 0.35, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.7, 3.0, 3.8 křivky dotykového napětí

 $V_{\rm vtp}$ . Tyto křivky jsou vykresleny na Obr. 6-16 vlevo nahoře. Uvedený obrázek je dále složen z 11 grafů ve kterých jsou pro každou křivku samostatně vyneseny průběhy pravděpodobnosti fibrilace v závislosti na době působení napětí těchto křivek a dále pak v každém z těchto 11 grafů jsou vyneseny 3 křivky s výsledky výpočtu skriptem Erisk při použití odporu lidského těla pro 5, 50 a 95 % populace. Princip grafů je pak obdobný jako pro Obr. 6-14 a Obr. 6-15 s tím, že byla měněna pouze velikost vstupního dotykového napětí do výpočtu. Tedy například v uvedeném Obr. 6-16 je graf ,Pfib 1.00 Vvtp' totožný s grafem Obr. 6-14 (a). Tento souhrnný obrázek je dále ve svém pravém horním rohu doplněn o vynesenou plochu rozložení pravděpodobnosti fibrilace pro daný pár c-křivek, na které je vyneseno všech 11 křivek násobků Vvtp vypočtených pro odpor lidského těla pro 50 % populace. Z tohoto pravého horního obrázku je tak vcelku dobře patrné, že použitím uvedených 11 různých násobků křivky dovolených dotykových napětí lze relativně dobře zmapovat plochu rozložení pravděpodobnosti fibrilace, neboť daným křivkám odpovídají přibližně konstantní pravděpodobnosti fibrilace postihující význačné oblasti tohoto rozložení. Násobky těchto křivek byly přibližně voleny takové, aby byly zmapovány oblasti v okolí c-křivek (tj. c1~0.5Vvtp, c2~0.8Vvtp, c3~1-1.5Vvtp, c4~2.7Vvtp) a pak v oblastech horních a spodních mezí rozložení (tj. 0.05, 0.1, 0.35 a 3.0, 3.8 Vvtp). Tyto horní a spodní meze jsou zvoleny přibližně tak, aby pokrývaly interval pravděpodobností od 0.5 % do 99.5 %. Z průběhu plochy rozložení pravděpodobnosti fibrilace je pak zřejmé, že hodnoty pod spodní mezí a nad horní mezí se již pouze limitně blíží 0 či 1 a v těchto oblastech tak již nedochází k velkým změnám. Pro hodnoty napětí a časy působení těchto křivek pak byly stanoveny pravděpodobnosti fibrilace také pomocí programu Argonium a tyto hodnoty jsou v obrázku vyneseny červenými hvězdičkami. Z uvedených průběhů 11 křivek násobků dovoleného dotykového napětí tak lze provést relativně detailní porovnání mezi plochou pravděpodobnosti fibrilace podle skriptů Erisk a mezi výsledky udávanými programem Argonium.

Z uvedených průběhů je zřejmá relativně dobrá shoda mezi výsledky získanými reprodukovanými skripty Erisk a programem Argonium. Uvedené porovnání na Obr. 6-16 bylo provedeno pro scénář 1 podle Obr. 6-1, tedy bez přídavné izolace bot a případ s nulovou rezistivitou půdy, nicméně velikost rezistivity půdy byla nastavena v obou programech na hodnotu 5  $\Omega$ m v důsledku nemožnosti nastavit nižší hodnotu v programu Argonium. Dotykový scénář byl zvolen LHBF a to s ohledem na popis v EG-0 a EN50522. Jak bude diskutováno dále, jeho různá volba může mít na výsledky relativně velký vliv, nicméně pro další vyhodnocení bude uvažováno, že tato dráha proudu byla použita i v programu Argonium. Pakliže by v tomto programu byla použita jiná dráha proudu, úloha nalezení nejvhodnější kombinace c-křivek by se stala prakticky neřešitelnou, neboť by bylo možné nalézt více možných řešení. Ze zavedeného předpokladu dráhy proudu LHBF pak lze porovnáním průběhů násobků křivek dotykových napětí vybrat jednu z šestice kombinací c-křivek takovou, že výsledky stanovené sestrojenými skripty Erisk nabývají hodnot přibližně stejných či konzervativnějších než výsledky získané z programu Argonium. Obrázky Příloha B Obr. B 1 až Obr. B 5 spolu s Obr. 6-16 pak vykreslují průběhy pravděpodobností fibrilace stanovené skripty Erisk v porovnání s hodnotami stanovenými programem Argonium pro všech 6 kombinací c-křivek použitých pro tvorbu plochy rozložení pravděpodobnosti fibrilace. Z porovnání průběhů všech 6x11 křivek pravděpodobnosti fibrilace pro tento dotykový scénář lze zjistit, že při použití křivek c3 a c4 je dosaženo prakticky nejvhodnější shody a tento případ je vyobrazen právě na Obr. 6-16. Volba těchto dvou křivek pro odpor pro 50 % populace pak vede k rozdílu absolutních hodnot fibrilace o přibližně až 20 %, kdy takto získané výsledky vedou k naddimenzovanému návrhu.



Obr. 6-16 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c3-c4 bez přídavných izolací

Z provedeného porovnání je pak zřejmé, že prakticky všechny kombinace c-křivek mají problém dobře zachytit chování pravděpodobnosti fibrilace v oblasti malých napětí (tj. 0.05-0.5 Vvtp). Právě proto byly také vybrány křivky c3 a c4 jelikož podstatnější je správě stanovená mez od kdy se již může vyskytovat fibrilace, byť i s malou pravděpodobností, než případy, kdy je již fibrilace prakticky jistá či silně pravděpodobná (>90 %). Z tohoto hlediska by se mohla jako vhodná náhrada také jevit kombinace křivek c2-c4, nicméně u této kombinace dochází k horším výsledkům právě pro případy s malými napětími. Z uvedených obrázků Obr. B 1 až Obr. B 5 a Obr. 6-16 je také patrné, že křivky c1 až c4 neodpovídají přesně logaritmicko-normálnímu rozdělení, neboť výsledky pro těchto 6 kombinací jsou relativně dost rozdílné. Je dobře patrné, že některé kombinace vedou na mnohem strmější rozdělení (c1-c3 a c2-c3) než ostatní.

Z výsledků Obr. 6-16 se tak jeví, že použitím křivek c3 a c4 pro modelování pravděpodobnosti fibrilace za současného použití odporu lidského těla pouze pro 50 % populace lze dosáhnout výsledků velice blízkých jako z programu Argonium. To jinými slovy znamená, že volbou těchto křivek by bylo možné vyhnout se problematickému modelování pravděpodobnostního rozložení odporu lidského těla a použít při výpočtu prostou hodnotu odporu pro 50 % populace.

K danému závěru je nezbytné zmínit, že výběr těchto křivek je postaven na uvedeném předpokladu, že v programu Argonium byla použita dráha proudu LHBF a dále tento předpoklad platí pro dotykový případ bez přídavné izolace. Vzhledem k tomu, že dráha proudu v programu Argonium nelze libovolně volit, lze předpokládat, že výsledky pro dráhu proudu v programu Argonium udávanou jako hand-to-feet (ruka nohy) by měly být zvoleny tak, aby postihovaly i nejhorší dotykové scénáře jakým je právě scénář LHBF. Pakliže by tento scénář dotyku v programu Argonium odpovídal stavu BHBF, tak by přijaté zjednodušení použití prosté hodnoty odporu lidského těla spolu s křivkami c3-c4 vedlo k většímu naddimenzování rizika (Obr. B 12) a bylo by zapotřebí provést obdobné porovnání pro dráhu proudu BHBF a stanovit vhodnou kombinaci c-křivek (pokud by existovala).

K danému závěru je ještě nezbytné zmínit, že navrhovaná náhrada modelování odporu lidského těla prostou hodnotou namísto jejího pravděpodobnostního rozdělení nemá žádný teoretický základ a toto navržené řešení prakticky vychází pouze z faktu, že křivky c1-c4 nejsou úplně přesně logaritmicko-normálně rozdělené [117]. Lze se tak domnívat, že pakliže by byly v programu Argonium zvoleny také právě křivky c3 a c4 s dráhou proudu LHBF, tak uvedené zjednodušení by již nemuselo fungovat, nicméně přesný způsob proložení těchto c-křivek autoři programu Argonium a potažmo EG-0 neuvádějí [117]. Ovšem vzhledem k tomu, že výsledky podle programu Argonium jsou již dnes v některých zemích při návrhu zemničů používané [118], tak lze tyto považovat za dostatečně referenční, neboť lze předpokládat, že výsledky programu Argonium prošly řádným schvalovacím procesem a byly přijaty příslušnou vědeckou i inženýrskou komunitou.

Z výše uvedeného je tedy zřejmé, že pravděpodobnostní rozložení odporu těla lze relativně dobře modelovat pomocí křivek c3-c4 a hodnotou odporu pro 50 % populace. Uvedené zjednodušení bylo přijato pro případ bez přídavných izolací a tak je dále nezbytné stanovit případné rozdíly mezi oběma programy v případě přítomnosti přídavných izolací. Jak bylo zmíněno dříve, tak v programu Erisk je přídavná izolace obuvi modelována opět prostou hodnotou, kdy naproti tomu Argonium využívá pravděpodobnostního rozdělení podle EG-0. Nejprve tak byl zkoumán případ kdy se rezistivita povrchové vrstvy půdy blíží 0  $\Omega$ m (5  $\Omega$ m v důsledku minimální hodnoty pro Argonium) a je přítomna obuv, tedy ve skriptech Erisk byly vyzkoušeny různě velké velikosti

odporu obuvi jako 1000, 2000 a 5000  $\Omega$ . Později pak byl zkoumán vliv, kdy je přítomna jak obuv, tak i rezistivita povrchové vrstvy půdy – zvolen jen jeden scénář s  $\rho = 5000 \ \Omega m$ . Pro zjištění vhodné velikosti odporu obuvi tak, aby skripty Erisk dosahovaly výsledků obdobných či konzervativnějších jak program Argonium, bylo opět provedeno porovnání na sérii 11 křivek násobků dotykového napětí scénáře 1, Obr. 6-1, ovšem byly zvoleny větší násobky této křivky tak, aby byly odečítány hodnoty pravděpodobnosti fibrilace v oblasti strmého nárůstu plochy jejího rozložení. Pro případ s přítomností obuvi byly zvoleny násobky 0.05, 0.21, 0.47, 0.94, 2.6, 5.2, 6.76, 15.6, 19.8, 25.7 a 36.4 Vvtp, kdy násobkům 0.47, 0.94, 5.2 a 19.8 měly postupně odpovídat úrovně konstantní pravděpodobnosti fibrilace podle c-křivek jako 0.1, 5, 50 a 95 % v programu Argonium. Pro případ s obuví a i s velkou rezistivitou půdy 5000  $\Omega$ m pak byly násobky zvoleny ještě větší a to 3.2, 3.8, 5.7, 10.5, 13.3, 19, 24.7, 32.3, 38, 47.5 a 57, kdy násobkům 3.8, 5.7, 19 a 38 měly postupně odpovídat úrovním konstantní pravděpodobnosti fibrilace 0.1, 5, 50 a 95 % v programu Argonium. Výsledky porovnání pro případ s minimální rezistivitou půdy a pro různé nastavené velikosti odporu obuvi jsou vyneseny na Obr. 6-17, Obr. B 6 a Obr. B 7. Pro případ s velkou rezistivitou půdy a měnící se velikostí odporu obuvi jsou pak výsledky vyneseny na Obr. 6-18, Obr. B 8 a Obr. B 9.

Z těchto výsledků s přítomností přídavných izolací pak lze vypozorovat, že zvolené modelování přídavné izolace obuvi v programu Argonium má na výsledky značný vliv a to mnohem větší než v dříve diskutovaném případě modelování rozložení odporu lidského těla v populaci. To je zřejmě zapříčiněno relativně plochým rozložením odporu obuvi, kdy EG-0 [37] navrhuje až v 40 % případů odpor obuvi větší jak jeden M $\Omega$ , nicméně přesný postup implementace rozložení odporu obuvi EG-0 neuvádí. Je poněkud zajímavé, že program Argonium v případě relativně velikých napětí v řádech jednotek kV až po 10 kV udává v porovnání se skripty Erisk pravděpodobnosti fibrilace menší jak 1. Toto je pak zvláště patrné na průbězích v oblasti dlouhých časů působení. U výsledků z programu Argonium je dále vcelku zajímavé, že pro veliká napětí výsledky z tohoto programu vykazovaly určitý schodovitý charakter a nabývaly pouze určitých stejných hodnot i při změně napětí a času působení. Toto by mohlo být nejspíše zapříčiněno způsobem zahrnutí pravděpodobnostních rozložení odporu obuvi a i odporu lidského těla [115]. Z výsledků s minimální rezistivitou půdy pak lze vyvodit závěr, že nejvhodnější náhrada odporu obuvi místo jejího pravděpodobnostního rozdělení je hodnota 1000 Ω. Tuto hodnotu lze doporučit především s ohledem na získání korektnějších výsledků v případě menších napětí (0.47 Vvtp), která se pohybují stále v řádu několika stovek voltů (<400 V) pro krátké časy působení. Tato volba sice vede na případné předimenzování v případě vysokých dotykových napětí (o až 60 % podle Obr. 6-17), nicméně použití větší hodnoty velikosti odporu obuvi by vedlo k případům s značným poddimenzováním rizika v případech s dotykovými napětími v řádech až do jednotek kV Obr. B 6 a Obr. B 7.

Z výsledků s uvažovanou nenulovou rezistivitou povrchové vrstvy půdy je pak zřejmé, že doporučenou velikost odporu obuvi 1 k $\Omega$  lze považovat za značně konzervativní, neboť se jeví, že s rostoucí rezistivitou povrchové vrstvy půdy by bylo vhodnější obuv modelovat větší velikostí odporu - Obr. 6-18 a Obr. B 8 a Obr. B 8. V těchto případech je pak zřejmé, že odpor obuvi okolo 5 k $\Omega$  by se mohl jevit jako vhodnější. V případech s větší rezistivitou povrchové vrstvy půdy tak dochází k předimenzování o absolutní rozdíl pravděpodobnosti fibrilace přibližně až o 60 % oproti programu Argonium. V oblasti malých dotykových napětí pak doporučená velikost odporu obuvi 1 k $\Omega$  může vést k určení vyšší pravděpodobnosti fibrilace až o jednotky řádů (10 % vs 1 %, 0.1 % atp.). Zvolená zjednodušení modelování odporu lidského těla a obuvi pomocí prostých hodnot byla zvolena tak, aby nedocházelo k příliš velkým změnám ve velikosti několika řádů. V případě použití

odporu obuvi 1 k $\Omega$ , vysokých hodnotách rezistivit povrchové vrstvy půdy a malých napětí pak uvedený postup může vést k značnějšímu předimenzování návrhu. Nicméně velikost odporu obuvi 1 k $\Omega$  je zvolena především s ohledem na dotek s minimální velikostí rezistivity půdy, kde by volba větší hodnoty jednoznačně vedla k poddimenzování rizika konečného návrhu zemnící soustavy.

Pro případy s přídavnou izolací byly také zkoumány varianty zvolených c-křivek obdobně jak pro dotyk bez přídavných odporů. K provedené vizuální inspekci těchto ostatních variant lze říci, že pro různé páry c-křivek lze vypozorovat podobné závěry jako pro případ bez přídavných odporů. Pakliže podle diskutovaných kritérií výběru nejvhodnějších c-křivek by bylo možné jednotlivé kombinace podle Tab. 6-5 seřadit sestupně jako c3-c4, c1-c4, c2-c4, c1-c3, c2-c3 a c1-c2, tak toto pořadí vhodnosti modelování rozložení pravděpodobnosti fibrilace bylo možné pozorovat i pro případ s přítomností obuvi a dále i pro případ s přítomností jak obuvi, tak i velkou velikostí rezistivity půdy. S rostoucí přídavnou impedancí by se pak dalo říci, že rozdíly mezi výsledky pro různý pár c-křivek se zmenšovaly, nicméně jako stále nejvhodnější se jevily varianty c3-c4 a c1c4. Z hlediska množství takto analyzovaných dat pak výsledky pro různé kombinace c-křivek pro případy s přídavnými odpory nejsou v této práci uvedeny a je zde proveden pouze tento komentář.

Posledním zatím příliš nediskutovaným zdrojem rozdílů je pak také zvolená dráha proudu tělem. Jak bylo uvedeno dříve, tak navržené zjednodušení je odvozeno pro případ dráhy proudu levá ruka obě nody LHBF. Z hlediska drah proudu při dotykovém scénáři tato patří k jedněm z nejhorších případů, kdy horší je už jen dráha proudu obě ruce obě nohy BHBF (podle velikosti odporu těla a velikosti koeficientu F určujícím závažnost proudu při průchodu tělem různými dráhami). Pro získání alespoň částečného náhledu, jaký vliv má různá dráha proudu tělem na výslednou velikost pravděpodobnosti fibrilace byl proveden výpočet pravděpodobností fibrilace pro další 3 různé dráhy proudu tělem a to pro případy bez přídavné izolace, pro případ s botami 1 kΩ a pro případ s botami 1 kΩ a povrchovou vrstvu 5 kΩ. Byly zvoleny dráhy proudu pro dotykové scénáře od nejpříznivějšího po nejnepříznivější a to pravá ruka pravá noha RHRF, levá ruka levá noha LHLF a obě ruce obě nohy BHBF. Výsledky pro tyto různé dráhy proudu jsou pak vyneseny v příloze B na Obr. B 10 až Obr. B 18. V porovnání s přijatou dráhou proudu levá ruka obě nohy LHBF, pro kterou jsou výsledky vyneseny na Obr. 6-16, Obr. 6-17 a Obr. 6-18, pak lze říci, že použití odlišné dráhy proudu může znamenat rozdíl absolutních hodnot pravděpodobnosti fibrilace do 60 % pro dané dotykové scénáře. Pro malé velikosti napětí, kde jsou pravděpodobnosti fibrilace relativně malé  $\sim 1$  % pak ovšem rozdíly mohou činit i jednotky řádů (tj. 1 %, 0.1 %, 0.01 % atp.).



Obr. 6-17 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c3-c4 s Rshoe 1000 Ω a ρ 5 Ωm



Obr. 6-18 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovolených dotykových napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c3-c4 s Rshoe 1000 Ω a ρ 5000 Ωm

#### 6.4.3 Shrnutí navržených zjednodušení

Z provedené analýzy se jeví, že modelování odporu lidského těla i odporu obuvi by mohlo být možné i pomocí prostých hodnot a nikoli pomocí jejich odpovídajících pravděpodobnostních rozloženích. Z provedeného srovnání s programem Argonium, tedy s dnes komplexnějším přístupem podle EG-0 v porovnání s autorovým implementovaným Erisk, se jeví, že při použití dráhy proudu tělem LHBF, odporu lidského těla pro 50 % populace [4], odporu obuvi o hodnotě  $1 \text{ k}\Omega$  a užití křivek c3 a c4 pro proložení plochy rozložení pravděpodobnosti fibrilace lze dosáhnout relativně dobré shody s výsledky, kdy odpor lidského těla i obuvi jsou modelovány celým odpovídajícím pravděpodobnostním rozložením. Při užití tohoto zjednodušení lze předpokládat rozdíly mezi oběma přístupy v řádech absolutních rozdílů pravděpodobnosti fibrilace až do 60 %. V případě relativně malých dotykových napětí (cca do 200 V) se pak jeví, že tento zjednodušený přístup může vést k určitému poddimenzování, kdy pro tyto případy tento přístup udává pravděpodobnosti fibrilace menší i o jednotky řádů. K tomuto je ovšem nezbytné zmínit, že v těchto případech se jedná již i z programu Argonium o dotyková napětí s vcelku malou pravděpodobností fibrilace v řádech < 1 %. Výhodou tohoto zjednodušení je pak možnost neprovádět relativně složitou implementaci pravděpodobnostního výpočtu zahrnujícího právě pravděpodobnostní rozložení odporu lidského těla a odporu obuvi. K danému přístupu je pak dále vhodné zmínit, že v případě velkých rezistivit povrchové vrstvy půdy tento vede k relativně velkému naddimenzování, nicméně zastává konzervativnější výsledky.

K uvedeným zjištěním je dále dobré zmínit, že vhodnější analýzou provedených zjednodušení by byla reprodukce celého výpočtu podle programu Argonium (EG-0), kdy by bylo možné výpočet plně automatizovat a provést pro libovolné nastavení, neboť program Argonium neumožňuje volbu vstupních parametrů libovolnou (rezistivity půdy např pouze jako 5, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 a 5000  $\Omega$ m, přičemž program Argonium dále například neumožňuje použít velkou rezistivitu půdy pro případ bez obuvi atp.).

#### 6.5 Pravděpodobnost koincidence

V předchozích kapitolách 6.2, 6.3, 6.4 a v kapitole 5 byly řešeny části pravděpodobnostního výpočtu stanovující úrovně odolnosti a úrovně nebezpečí podle vztahu (6-1). Jak bylo uvedeno na začátku této kapitoly 6, tak pro vznik rizikové situace musí být kromě podmínek 3 až 7 vztahujících se k úrovním odolnosti a nebezpečí také naplněny podmínky 1 a 2 vztahující se k pravděpodobnosti dotyku osoby a současného vzniku nebezpečné situace (poruchy) na elektrickém zařízení. Pravděpodobnost současnosti dotyku a vzniku poruchy je v tomto dokumentu označena jako pravděpodobnost koincidence a to v souladu se zavedeným značením podle EG-0 [37] (pozn. koincidence může být jinak i synonymem pro pravděpodobnost). Lze předpokládat, že jev koincidence je jevem nezávislým na výsledku konvoluce úrovní nebezpečí a odolností, tj. lze oba jevy považovat za jevy nezávislé a výslednou hodnotu individuálního rizika tak lze stanovit součinem pravděpodobnosti koincidence a výsledku konvoluce úrovní nebezpečí a odolností

(6-1). Pakliže pravděpodobnosti nebezpečí a odolnosti nejsou v autorem reprodukovaném přístupu získány metodou Monte Carlo, jak bylo diskutováno v kapitolách 4 a 6.4, ale jsou stanoveny jako pouhá čísla, tak výsledek konvoluce  $P_{applied}*P_{withstand}$  lze označit zjednodušeně jako  $P_{fib}$ . Pak vztah (6-1) pro individuální riziko přejde ve tvar

$$P_{IR} = (P_{applied} * P_{withstand}) \cdot P_{coinc} = P_{fib} \cdot P_{coinc}$$
(6-28)

V tomto vztahu je pravděpodobnost fibrilace  $P_{\rm fib}$  určena přímo pro úroveň nebezpečí (dotyková napětí) a je tak získán "výsledek konvoluce přímo" (tj. výpočet není proveden přes pravděpodobnostní rozložení a metodu Monte Carlo). Pro stanovení pravděpodobnosti fibrilace lze vyjít z postupu podle 6.4. Pro výpočet pravděpodobnosti fibrilace je dále nezbytné určit proud tělem, který lze stanovit z jednoduché poruchové analýzy (např. metoda ekvivalentního zdroje v místě zkratu [119]) spolu se znalostí modelování rozložení potenciálu v okolí zemniče podle kapitoly 5.

V případě pravděpodobnosti koincidence lze v současnosti v literatuře nalézt dva odlišné výpočtové vztahy lišící svojí komplexností. Zjednodušeným odvozením za předpokladu rovnoměrného výskytu jevů (pravděpodobnostních rozdělení) a dále nezávislosti obou nezbytných jevů – jev vzniku poruchy (bod 2 na začátku kap. 6) a jev dotyku (bod 1 na začátku kap. 6) - pak lze stanovit následující vztah (6-29) podle BS EN 50522 [35]

$$P_{coic} = P_F \cdot P_E = f_n \cdot \frac{p_n \cdot p_d}{365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}$$
 (6-29)

kde  $P_F$  je pravděpodobnost výskytu poruchy a její hodnota se rovná průměrnému počtu poruch za rok  $f_n$ . Potom  $P_E$  je pravděpodobnost dotyku, kterou lze stanovit z průměrné doby trvání dotyku  $p_d$  (v sekundách) a průměrného počtu dotyků za rok  $p_n$ . Pro získání roční hodnoty pravděpodobnosti koincidence je s ohledem na jednotku doby trvání dotyku  $p_d$  vztah dále vydělen počtem sekund za rok.

Přestože norma BS EN 50522 neuvádí, jak byl vztah odvozen, lze si jeho princip vysvětlit přibližné následovně. Pravděpodobnost dotyku v tomto vztahu prakticky uvádí procentuální část roku, po kterou byla osoba v kontaktu se zařízením. V případě pravděpodobnosti poruchy se pak lze domnívat, že definice této pravděpodobnosti je silně zjednodušující, neboť prakticky říká, že po 20 procent času dotyku dojde k současné poruše (*pozn. která bude ovšem trvat pouze krátký čas podle nastavení ochran - pro výpočet P*<sub>fib</sub>). Přes uvedené zjednodušení bude ovšem dále ukázáno, že vztah může udávat relativně srovnatelné výsledky v porovnání s komplexnějším modelováním pomocí Poissonova procesu.

Druhým, na první pohled ne příliš odlišným, výpočtovým vztahem pro pravděpodobnost koincidence lze v literatuře nalézt vztah (6-30) podle příručky EG-0 [37].

$$P_{coic} = \frac{f_n \cdot p_n \cdot (f_d + p_d) \cdot T}{365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} \cdot CRF$$
 (6-30)

Kde  $p_d$ ,  $p_n$  a  $f_n$  jsou parametry stejné jak v případě vztahu (6-29). Parametr  $f_d$  pak udává průměrnou doba trvání poruchy (v sekundách), T je počet vyhodnocovaných let (obvykle se udává rovno 1 roku pro získání ročního individuálního rizika  $P_{IR}$ ) a *CRF* je zavedený koeficient zohledňující chování lidí s ohledem na zavedená výstražná a omezující opatření [37]. Tj. např. při umístění výstražné tabule varující před nebezpečí úrazu elektrickým proudem lze *CRF* položit rovno 0.8, tj. dojde k 20% snížení počtu dotyků v důsledku této tabule atp. Obvykle lze tento koeficient považovat za rovný 1. Potom pakliže *T* i *CRF* jsou rovny 1, tak vztah (6-30) se od vztahu (6-29) liší pouze parametrem délky trvání poruchy  $f_d$ .

Přestože by se mohlo jevit, že vztahy (6-29) a (6-30) jsou relativně podobné, tak je nezbytné říci, že vztah (6-30) podle EG-0 je založen na modelování pravděpodobnosti dotyku a poruchy pomocí Poissoných rozložení. Poissonovo rozdělení je právě vhodné pro modelování v čase náhodných jevů, které jsou na sobě nezávislé. Dle zavedeného odvození podle EG-0 vztah (6-30) udává, jaká je pravděpodobnost, že po dobu dotyku osoby s elektrickým zařízením dojde k jedné

a více nesoučasných poruch, a zároveň, že v průběhu trvání jedné poruchy dojde k jednomu a více dotyků. Tyto pravděpodobnosti jsou stanoveny z Poissonových distribučních funkcí se vstupními parametry  $p_d$ ,  $p_n$ ,  $f_d$  a  $f_n$ . Přes uvedenou komplexnost tohoto odvozeného vztahu je ovšem částečně diskutabilní, co si lze v případě tohoto vztahu představit nad náhodnými jevy současného dotyku a výskytu 2 a více poruch a stejně tak současné poruchy a výskytu 2 a více dotyků. Jelikož je vztah použit pro výpočet individuálního rizika vztahujícího se pouze k jednomu konkrétnímu jedinci, lze tak relativně s jistotou předpokládat, že v případě výskytu prvního koincidenčního jevu (tj. současného dotyku a poruchy), již pro daný časový interval poruchy (či dotyku) k druhému dotyku (či poruše) nedojde, neboť zasažený jedinec bude na vzniklou situaci reagovat. Příručka EG-0 k tomuto žádný komentář neposkytuje, a tak si lze například představit zahrnutí i stavů, jakými by mohly být např. porucha trvající několik dní (hodin) s současným vícenásobným dotykem v průběhu jejího trvání, například pak s malými dotykovými napětími, a tedy nevzbuzující pozornost zasažené osoby a zároveň s malou úrovní rizika atp. Vztah podle EG-0 tak umožňuje do výsledného individuálního rizika zahrnout i tyto případy.

Lze tedy předpokládat, že vztah ( 6-30 ) je založen na pokročilejším matematickém aparátu a měl by dosahovat přesnějších výsledků jak zjednodušený vztah ( 6-29 ). Jak bylo zmíněno výše, tak oba vztahy se od sebe liší pouze jedním parametrem, kterým je délka trvání poruchy. K vztahu ( 6-30 ) je dále nezbytné zmínit, že pro jeho odvození bylo v EG-0 zavedeno několik zjednodušení. Nejpodstatnějším pak je, že při rozvoji exponenciální funkce z Poissonova rozdělení v Taylorovu řadu byly zanedbány všechny členy rozvoje s řádem třetím a vyšším, což EG-0 uvádí, že by nemělo mít značný vliv na získané výsledky. Dále bylo zavedeno ještě několik drobnějších zjednodušení zanedbáním některých menších členů postupného matematického odvození. Pro získání představy o rozdílu mezi oběma výpočtovými vztahy bylo provedeno jednoduché porovnání jejich výsledků při změně délky trvání poruchy, na kterém je vztah podle britského standardu BS EN 50522 nezávislým. Porovnání velikostí pravděpodobnostní koincidence podle obou vztahů je vyneseno na Obr. 6-19.

Z výsledků v tomto obrázku je pak zřejmé, že relativně malé chyby mezi oběma výpočtovými vztahy lze dosáhnout, pokud je průměrná délka trvání poruchy přibližně o dva řády menší, jak průměrná délka dotyku. V tomto případě je pak rozdíl mezi výsledky z obou vztahů menší jak 1 % což lze dokázat i odvozením vztahu relativní odchylky mezi oběma vztahy podle (6-31). Naopak je z provedeného porovnání zřejmé, že v případě délky poruchy srovnatelné či delší jak průměrná délka dotyku, pak zjednodušený vztah podle britského standardu udává výsledky značně poddimenzované, kdy výsledná pravděpodobnost koincidence nabývá výsledků o několik řádů menších. Z hlediska výpočtů rizik i v rámci distribučních sítí je vhodné zmínit, že tyto sítě jsou často provozovány jako sítě kompenzované, kde se mohou vyskytovat jednofázové poruchy po značně dlouhou dobu s dobou trvání v řádu i několika hodin. Z uvedených výsledků je tak zřejmé, že vztah podle britského standardu je v případě těchto kompenzovaných distribučních sítí značně nevhodný a může vést k poddimenzování výsledného rizika. V případě účinně uzemněných sítí s časy vypnutí poruchy v řádech desítek až stovek milisekund s průměrnou hodnotou 80 ms [33] lze výsledky podle britského vztahu považovat za relativně dostatečné s chybou v řádu jen několika jednotek procent. V případě kompenzovaných distribučních sítí je ovšem vhodnější použití vztahu (6-30) podle australské příručky EG-0. Tento vztah byl použit i dále při provedení citlivostní analýzy na případové studii zemniče v distribuční síti v následující kapitole 6.6.

Porovnání výsledků obou výpočtových vztahů spolu s uvedeným doporučením pro použití vztahu podle australské příručky EG-0 pro distribuční kompenzované sítě bylo autorem prezentováno v časopiseckém příspěvku [105].



*Obr.* 6-19 Porovnání hodnot pravděpodobností koincidence podle britského standardu BS EN 50522 a australské příručky EG-0 při proměnné délce trvání poruchy fd, a pro počet poruch fn = 1 za rok, počet dotyků pn 1000 za rok a průměrnou délku trvání dotyku pd 1s

## 6.6 Aplikace pravděpodobnostního přístupu v distribučních soustavách

Stěžejním cílem práce byla aplikace pravděpodobnostního přístupu na zemnič v distribuční sítí. Na základě všech dříve diskutovaných okolností pravděpodobnostního výpočtu, přesnosti modelování zemniče a ještě několika dále popsaných problémů lze nyní přistoupit k samotnému příkladu aplikace pravděpodobnostního přístupu na zemnič v distribuční síti. Na úvod je vhodné zmínit, že dále uvedené výsledky byly autorem prezentovány v různě obměněné a obsáhlé podobně v konferenčním příspěvku [120], časopiseckém příspěvku [105] a dále lze jejich rozšířenou podobu nalézt v technické příručce [102], na které se autor této práce spolupodílel v rámci pracovní skupiny JWG Cigre B3.35/CIRED "Substation earthing system design optimisation through the application of quantified risk analysis", a která vznikla s cílem soustředit a sjednotit poznatky z dané oblasti a také jako podkladový materiál pro následnou revizi EN 50522. Dále jak bylo zmíněno v kapitole 4, tak na získaných výsledcích a zvolených postupech pravděpodobnostního výpočtu se spolupodíleli autor této práce spolu s odborným asistentem Davidem Topolánkem.

Kromě článku [25] se prakticky všechny ostatní publikace (viz. kapitola 2) zabývaly aplikací pravděpodobnostního přístupu na zemniče v přenosové soustavě, tj. např. zemniče v rozvodnách, u stožárů venkovních vedení atp. Specifikem těchto případů je fakt, že v případě těchto zařízení jsou riziku v důsledku nárůstu elektrického potenciálu vystaveni především pracovníci provozovatele sítě spolu se zaměstnanci montážních, revizních a dalších subdodavatelských firem, kteří přichází do kontaktu s neživými částmi zařízení v důsledku vykonávaní své pracovní činnosti. V případě distribučních sítí platí toto stejné na úrovních napětí větších jak 1 kV. Pro úrovně napětí menší jak 1 kV již ovšem mohou být vystaveny riziku úrazu elektrickým proudem také osoby z širší

veřejnosti v důsledku zavlečení nárůstu potenciálu při poruše ze sítí vysokého napětí do sítí nízkého napětí. Tato laická veřejnost si pak ani nemusí být vědoma podstupovaného rizika. K zavlečení nárůstu potenciálu ze sítí vysokého napětí do sítí nízkého napětí dochází skrze nejčastěji budované společné uzemnění distribučních trafostanic (DTS) VN/NN (22/0.4 kV atp.), kdy zemnič pro vysoké i nízké napětí je jeden a ten stejný. Pak v případě poruchy v síti vysokého napětí dochází v důsledku propojených uzemnění k nárůstu potenciálu také na neživých částech zařízení v síti nízkého napětí. Tento nárůst potenciálu nastává jak v důsledku poruchy na samotném transformátoru (např. proražení izolace na primárním vinutí distribučního transformátoru), tak i v důsledku poruch vyskytujících se výše v rozvodném systému se zavlečením potenciálu do sítí NN skrze propojené stínění připojených kabelových vedení atp. Způsob zavlečení potenciálu ze sítě vysokého napětí na neživé části elektrických zařízení v síti nízkého napětí je zřejmý z Obr. 6-20.



Obr. 6-20 Společné uzemnění strany vysokého i nízkého napětí DTS, naznačeny toky proudů při různých poruchách [105]

Druhým specifikem aplikace pravděpodobnostního přístupu na zemniče v distribučních sítích pak mohou být relativně dlouhé časy vypnutí poruchy a tedy zvýšená pravděpodobnost, že v případě poruchy dojde k současnému dotyku osoby s neživými částmi elektrických zařízení v sítích nízkého napětí. Dlouhé časy vypnutí souvisí především se způsobem uzemnění uzlu dané distribuční soustavy. V České republice se distribuční sítě zpravidla provozují jako kompenzované, kde doba vypnutí jednofázové poruchy (zemního spojení) může dosahovat i několika hodin. V případě dříve aplikovaných přístupů tak byly uvažovány pouze případy z přenosové soustavy, kdy v těchto účinně uzemněných rozvodech lze předpokládat časy vypnutí poruchy v řádu několika desítek až jednotek stovek milisekund (viz. [33] a komentář k výpočtovým vztahům  $P_{\text{coic}}$  v 6.5). K tomu je ovšem vhodné zmínit, že způsob provozování distribuční sítě má také vliv na úrovně poruchových proudů, a tedy velikosti vzniklých dotykových napětí jsou při vzniklém zemním spojení jednoznačně menší, než při kovových zkratech v účinně uzemněných sítích. Jak bude ovšem ukázáno dále, tak v případě výskytu vícefázových poruch (například přechod zemního spojení ve dvojité zemní spojení/ dva nesoumístné současné jednofázové zkraty) může docházet k mnohem větším nárůstům potenciálu, které již mohou znamenat i značné riziko v sítích nízkého napětí. K tomuto je dále vhodné zmínit, že současný přístup posuzování bezpečnosti zemničů podle EN 50522 [2] ovšem vícefázové poruchy nepožaduje do vyhodnocení zahrnout.

Pro demonstrování aplikace pravděpodobnostního přístupu v distribuční síti tak byl vytvořen zjednodušený model elektrické sítě, ve kterém bylo výpočtem stanoveno riziko při vzniku poruchy. Pro získání představy, jaký vliv mohou mít různé parametry na výsledné riziko byla následně provedena citlivostní analýza a na jejich výsledcích jsou dále diskutovány také výsledky z možných nepřesností modelování zemničů v distribučních sítí v souladu s výsledky kapitoly 5.4.2.

V následující kapitole 6.6.1 je tedy představen základní model distribuční sítě a pak v kapitole 6.6.2 jsou prezentovány výsledky provedené citlivostní analýzy vybraných parametrů.

#### 6.6.1 Model distribuční sítě - případová studie

Demonstrace užití pravděpodobnostního přístupu pro posouzení bezpečnosti zemniče byla provedena pro jednoduchý kioskový zemnič distribuční trafostanice připojené do distribuční sítě 22 kV. Schéma zemniče je vyobrazeno na Obr. 6-21.



Obr. 6-21 Schéma zemniče kioskové distribuční trafostanice v případové studii

Tento zemnič byl složen ze základového zemniče, obvodového zemniče, ekvipotenciálního prahu a 4 zemnících tyčí. Zemnič byl zhotoven z pozinkovaného zemnícího pásku FeZn  $30x4 \text{ mm}^2$ . Závislost velikost zemního odporu tohoto zemniče byla stanovena pomocí zjednodušených hloubkově nezávislých výpočtových vztahů pro homogenní model půdy a společně s koeficienty využití podle [72] jako  $R_{\text{DTS}} = 0.04556\rho_{\text{s}}$ . Vzhledem k uvažovanému záměru dalšího použití v citlivostní analýze a také vzhledem k empirickému odhadu dotykových scénářů lze teto způsob výpočtu zemního odporu považovat za přijatelný a není nezbytné vyžadovat pokročilé metody modelování podle 5.2. Samozřejmě v případě požadavku na provedení detailního vyhodnocení tohoto zemniče může užití pokročilejších modelovacích metod vést k bezpečnostně i ekonomicky vhodnějším návrhům. Tento zemnič byl uvažován v místě vyhodnocované DTS v modelu zjednodušené distribuční sítě 22 kV podle Obr. 6-22.



Obr. 6-22 Schéma zjednodušené distribuční sítě s vyhodnocovanou DTS [105]

V tomto schématu jsou naznačeny 4 možnosti (celkem 5 stavů) zapojení uzlu transformátoru 110/22 kV jako účinně uzemněná, izolovaná, uzemněná přes odporník, uzemněná přes tlumivku (+stav s připnutým odporníkem pro zvýšení přesnosti lokalizace místa zemního spojení). V sestrojeném zjednodušeném modelu distribuční sítě (v programu Matlab [84]) bylo možné měnit parametry různých prvků sítě vyznačených v obrázku

-	U <sub>s</sub> (HV network)	<ul> <li>napětí zdroje/nadřazené soustavy 110 kV.</li> </ul>
-	f	- síťová frekvence 50 Hz.
-	I <sub>sk_3p</sub>	<ul> <li>počáteční souměrný zkratový proud 15 kA.</li> </ul>
-	$U_{r1}$	- jmenovité napětí transformátoru vyšší strana 110 kV.
-	$U_{r2}$	- jmenovité napětí transformátoru nižší strana 22 kV.
-	Sr	<ul> <li>jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru 40 MVA.</li> </ul>
-	$u_{ m k\%}$	- napětí nakrátko transformátoru 10 %.
-	$\varDelta P_{\rm k}$	<ul> <li>činné ztráty nakrátko transformátoru 90 kW.</li> </ul>
-	$X_{0\mathrm{T}}/X_{1\mathrm{T}}$	- poměr netočité reaktance transformátoru ku sousledné 1.5.
-	R <sub>n</sub>	- velikost odporníku v uzlu transformátoru 1 kA (~12.7 Ω).
-	$X_{ m L}$	- velikost uzlové tlumivky, odpovídala velikosti kapacitního proudu
		sítě $I_c = 200$ A.
	D	
-	$R_{\rm aux}$	- velikost přídavného rezistoru 20 A.
-	<i>R</i> <sub>aux</sub> <i>U</i> <sub>s</sub> (MV network)	<ul> <li>velikost přídavného rezistoru 20 A.</li> <li>velikost nominálního napětí sítě vysokého napětí 22 kV.</li> </ul>
-	$R_{aux}$ $U_s$ (MV network) $I_c$	<ul> <li>velikost přídavného rezistoru 20 A.</li> <li>velikost nominálního napětí sítě vysokého napětí 22 kV.</li> <li>kapacitní proud distribuční sítě 22 kV 200 A.</li> </ul>
- - -	$R_{aux}$ $U_s$ (MV network) $I_c$ $R_k$	<ul> <li>velikost přídavného rezistoru 20 A.</li> <li>velikost nominálního napětí sítě vysokého napětí 22 kV.</li> <li>kapacitní proud distribuční sítě 22 kV 200 A.</li> <li>poměrná rezistance vedení 0.224 Ω/km.</li> </ul>
- - -	$R_{aux}$ $U_s$ (MV network) $I_c$ $R_k$ $X_k$	<ul> <li>velikost přídavného rezistoru 20 A.</li> <li>velikost nominálního napětí sítě vysokého napětí 22 kV.</li> <li>kapacitní proud distribuční sítě 22 kV 200 A.</li> <li>poměrná rezistance vedení 0.224 Ω/km.</li> <li>poměrná reaktance vedení 0.287 Ω/km.</li> </ul>
- - - -	$R_{aux}$ $U_s$ (MV network) $I_c$ $R_k$ $X_k$ $R_{0k}/R_{1k}$	<ul> <li>velikost přídavného rezistoru 20 A.</li> <li>velikost nominálního napětí sítě vysokého napětí 22 kV.</li> <li>kapacitní proud distribuční sítě 22 kV 200 A.</li> <li>poměrná rezistance vedení 0.224 Ω/km.</li> <li>poměrná reaktance vedení 0.287 Ω/km.</li> <li>poměr netočivé rezistance vedení k sousledné 1.</li> </ul>
- - - -	$R_{aux}$ $U_{s} (MV network)$ $I_{c}$ $R_{k}$ $X_{k}$ $R_{0k}/R_{1k}$ $X_{0k}/X_{1k}$	<ul> <li>velikost přídavného rezistoru 20 A.</li> <li>velikost nominálního napětí sítě vysokého napětí 22 kV.</li> <li>kapacitní proud distribuční sítě 22 kV 200 A.</li> <li>poměrná rezistance vedení 0.224 Ω/km.</li> <li>poměrná reaktance vedení 0.287 Ω/km.</li> <li>poměr netočivé rezistance vedení k sousledné 1.</li> <li>poměr netočivé reaktance vedení k sousledné 1.</li> </ul>
- - - -	$R_{aux}$ $U_s$ (MV network) $I_c$ $R_k$ $X_k$ $R_{0k}/R_{1k}$ $X_{0k}/X_{1k}$ l	<ul> <li>velikost přídavného rezistoru 20 A.</li> <li>velikost nominálního napětí sítě vysokého napětí 22 kV.</li> <li>kapacitní proud distribuční sítě 22 kV 200 A.</li> <li>poměrná rezistance vedení 0.224 Ω/km.</li> <li>poměrná reaktance vedení 0.287 Ω/km.</li> <li>poměr netočivé rezistance vedení k sousledné 1.</li> <li>poměr netočivé reaktance vedení k sousledné 1.</li> <li>délka venkovního vedení 20 km.</li> </ul>
- - - - -	$R_{aux}$ $U_s$ (MV network) $I_c$ $R_k$ $X_k$ $R_{0k}/R_{1k}$ $X_{0k}/X_{1k}$ l $R_f$	<ul> <li>velikost přídavného rezistoru 20 A.</li> <li>velikost nominálního napětí sítě vysokého napětí 22 kV.</li> <li>kapacitní proud distribuční sítě 22 kV 200 A.</li> <li>poměrná rezistance vedení 0.224 Ω/km.</li> <li>poměrná reaktance vedení 0.287 Ω/km.</li> <li>poměr netočivé rezistance vedení k sousledné 1.</li> <li>poměr netočivé reaktance vedení k sousledné 1.</li> <li>délka venkovního vedení 20 km.</li> <li>přídavný odpor poruchy 5 Ω (např. jiskření, nedokonalá porucha).</li> </ul>
-	$R_{aux}$ $U_s$ (MV network) $I_c$ $R_k$ $X_k$ $R_{0k}/R_{1k}$ $X_{0k}/X_{1k}$ l $R_f$ r	<ul> <li>velikost přídavného rezistoru 20 A.</li> <li>velikost nominálního napětí sítě vysokého napětí 22 kV.</li> <li>kapacitní proud distribuční sítě 22 kV 200 A.</li> <li>poměrná rezistance vedení 0.224 Ω/km.</li> <li>poměrná reaktance vedení 0.287 Ω/km.</li> <li>poměr netočivé rezistance vedení k sousledné 1.</li> <li>poměr netočivé reaktance vedení k sousledné 1.</li> <li>délka venkovního vedení 20 km.</li> <li>přídavný odpor poruchy 5 Ω (např. jiskření, nedokonalá porucha).</li> <li>redukční faktor (vliv připojených stínění kabelu atp.) 1.</li> </ul>
-	$R_{aux}$ $U_s$ (MV network) $I_c$ $R_k$ $X_k$ $R_{0k}/R_{1k}$ $X_{0k}/X_{1k}$ l $R_f$ r $\rho_s$	<ul> <li>velikost přídavného rezistoru 20 A.</li> <li>velikost nominálního napětí sítě vysokého napětí 22 kV.</li> <li>kapacitní proud distribuční sítě 22 kV 200 A.</li> <li>poměrná rezistance vedení 0.224 Ω/km.</li> <li>poměrná reaktance vedení 0.287 Ω/km.</li> <li>poměr netočivé rezistance vedení k sousledné 1.</li> <li>poměr netočivé reaktance vedení k sousledné 1.</li> <li>délka venkovního vedení 20 km.</li> <li>přídavný odpor poruchy 5 Ω (např. jiskření, nedokonalá porucha).</li> <li>redukční faktor (vliv připojených stínění kabelu atp.) 1.</li> <li>rezistivita půdy (uvažován homogenní model) 100 Ωm.</li> </ul>

Dalším parametrem pak byl poměr  $EPR_{LV}/EPR_{MV} = 1$ . Jedná se o uměle zavedený poměr, vyjadřující jaká část nárůstu potenciálu zemniče se přenese ze zemniče vysokého napětí  $R_{MV}$  na zemnič nízkého napětí  $R_{LV}$  DTS podle Obr. 6-23 v případě, že by byly použité oddělené zemniče namísto společného. Použití odděleného zemniče by mohlo pomoci eliminovat zavlečení rizika ze

sítě vysokého napětí do sítě nízkého napětí. Velikost tohoto poměru by byla závislá na elektrických vlastnostech půdy a na vzdálenosti oddělených zemničů.



Obr. 6-23 Oddělené uzemnění strany vysokého a nízkého napětí distribučního transformátoru [105]

Zemnímu odporu DTS  $R_{\text{DTS}}$  (tj. společný, nebo oddělený  $R_{\text{LV}}$ ) byl dále stanoven celkový odpor uzemnění sítě nízkého napětí  $R_{\text{E}}$  podle (6-32) a (6-33) [121] jako paralelní kombinace odporu samotného zemniče a zemního odporu ochranného vodiče PE v síti NN (v důsledku připojených dalších rozptýlených zemničů v síti NN) u samostatných odběratelů aj. Pro základní hodnotu rezistivity půdy 100  $\Omega$ m pak tento odpor uzemnění nabývá hodnoty 1.39  $\Omega$ .

a)  $\rho_{\rm s} < 200 \ \Omega {\rm m}$ 

$$R_E = R_{DTS} || 2\Omega = \frac{R_{DTS} \cdot 2}{R_{DTS} + 2}$$
 (6-32)

b)  $\rho_{\rm s} > 200 \ \Omega {\rm m}$ 

$$R_E = R_{DTS} || \frac{\rho_s}{100} = \frac{R_{DTS} \cdot \frac{\rho_s}{100}}{R_{DTS} + \frac{\rho_s}{100}}$$
(6-33)

V uvedeném modelu zjednodušené distribuční soustavy byl uvažován vznik poruchy na dané DTS. Pro výpočet velikosti poruchových proudů byla použita metoda souměrných složek v souladu s IEC 60909 [119] s napěťovým koeficientem *c* zvoleným rovným 1. V případě kompenzované a izolované sítě byla velikost svodové rezistance zvolena jako 10 % celkové příčné reaktance sítě vysokého napětí. Riziko bylo vyhodnocováno pro všechny typy očekávatelných zemních poruch a to tedy pro jednofázovou zemní L-N, dvoufázovou zemní L-L-N a dvoufázovou zemní s nesoumístným výskytem označenou jako Cross L-L-N. Velikosti vypočtených poruchových proudů zemničem pro různé typy poruch a pro všechny 4 uvedené způsoby provozu distribuční sítě jsou uvedeny v Tab. 6-7. V této tabulce jsou dále uvedeny předpokládatelné časy nastavení základních ochran  $t_{clear}$  (~ $f_d$ ) a dále jsou v posledních dvou sloupcích uvedeny koeficienty  $K_n$  a  $F_n$ . Tyto koeficienty vznikly nepatrnou úpravou použitého vztahu pro výpočet koincidence ( 6-30 ) tak, aby tento mohl jednodušeji zahrnout také vliv automatiky opětovného zapnutí, kdy část poruch se v důsledku této automatiky vyskytne dvakrát. Vztah ( 6-30 ) přejde v

$$P_{coic} = \frac{p_n(K_n + F_n \cdot p_d) \cdot T \cdot CRF}{365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} \tag{6-34}$$

kde koeficienty  $K_n$  a  $F_n$ 

$$F_n = f_n \cdot (1 + ARC) \tag{6-35}$$

$$K_n = f_n \cdot (1 + ARC) \cdot f_d \tag{6-36}$$

Veličina *ARC* (-) značí procento poruch (poměrnou hodnotu), které se vyskytnou dvakrát, tedy jedná se o poruchy, které i po prvním vypnutí přetrvávají a k jejích odstranění nedošlo pomocí automatiky opětovného zapnutí. Například *ARC* = 0.3 znamená, že 30 % poruch se vyskytlo dvakrát. Ve vztahu (6-34) oproti (6-30) tak došlo pouze o roznásobení koeficientem (1+ARC).

Koeficienty  $F_n$  a  $K_n$  byly stanoveny na základě statistiky výskytu poruch v distribučních sítích podle Tab. 6-8. Uvedené hodnoty v této tabulce byly stanoveny expertním odhadem a je nezbytné zmínit, že distributoři v současné době nedisponují potřebnými statistikami, ze kterých by se dalo jednoznačně určit, které poruchy vedly/mohly vést k nárůstu potenciálu zemniče, kterou ochranou byly odstraněny atp. Pro uvedený modelový příklad byla dále uvažována pouze statistika poruch vyskytlých na samotné DTS. Údaje o počtu poruch pro vztah (6-34) je nezbytné přepočítat na průměrný počet poruch na 1 DTS, tedy např. pro L-N poruchy v kompenzované síti jako  $f_n = 20/2500$ . Zanesení potenciálu od poruch na venkovních vedeních zatím nebylo do výpočtu zahrnuto, nicméně postup by byl obdobný, kdy pro  $f_n$  by se uvažovalo s průměrným počtem poruch na 1 km distribuční sítě a tento by se následně vynásobil velikostí/rozlehlostí řešené distribuční sítě. Alternativní/doplňující popis řešení této problematiky byl také prezentován v autorově článku [105]. V Tab. 6-8 jsou také uvedeny použité hodnoty koeficientu pro automatiku opětovného zapnutí ARC.

Způsob uzemnění	Typ poruchy	Poruchový proud (A)	Čas vybavení ochran (s) t <sub>clear</sub> (~f <sub>d</sub> )	Fn	Kn
	L-N	19.66	1200	8.00E-03	9.60E+00
Kompenzovana	cross L-L	945.90	0.3	5.20E-04	1.56E-04
Kompenz. + Odporník	L-N	38.66	1	8.00E-03	8.00E-03
Uzemněná přes	L-N	538.09	0.3	1.04E-02	3.12E-03
odpor	cross L-L	945.90	0.3	0.00E+00	0.00E+00
laslovené	L-N	200.00	1	8.00E-03	8.00E-03
Izolovana	cross L-L	945.90	0.3	5.20E-04	1.56E-04
	L-N	969.75	0.3	1.04E-02	3.12E-03
Účinně uzemněná	L-L-N	675.76	0.3	1.18E-03	3.55E-04
	cross L-L	945.90	0.3	0.00E+00	0.00E+00

Tab. 6-7 Velikost vypočtených poruchových proudů a koincidenčních koeficientů pro zjednodušenou distribuční síť

Ze známého odporu uzemnění sítě nízkého napětí  $R_E$  (6-32), (6-33) a vypočtených poruchových proudů Tab. 6-7 pro zjednodušenou síť podle Obr. 6-22 byl následně stanoven celkový nárůst potenciálu zemniče  $U_{EPR/LV}$ . Velikosti nárůstu potenciálu zemniče pro kompenzovanou síť a pro různé typy poruch jsou uvedeny v Tab. 6-10. Posledními chybějícími údaji pro stanovení individuálního rizika  $P_{IR}$  (a tedy i  $K_n$ ,  $F_n$  a  $P_{coic}$ ) jsou statistické údaje a okolnosti dotykových scénářů. Jak bylo již zmíněno dříve, tak v důsledku propojení neživých částí elektrických zařízení zákazníků s uzemněním transformátoru dojde k šíření tohoto potenciálu i do sítě nízkého napětí, kde lze očekávat vystavení laické veřejnosti tomuto potenciálu. V této práci tak bylo vydefinováno celkem 6 dotykových scénářů a) až f), které by bylo možné předpokládat pro průměrnou osobu z laické veřejnosti, při kterých tato osoba může být vystavena vzniklému nárůstu potenciálu v důsledku poruchy ve VN distribuční síti. Tyto scénáře jsou uvedeny v Tab. 6-9. Je nezbytné zmínit, že volba scénářů spolu s jejich četností se v podstatě nezakládá na žádné hlubší analýze chování veřejnosti a jedná se tak spíše o expertní odhad. Je zřejmé, že zvolené scénáře s jejich parametry nemusí odpovídat chování všech jedinců v populaci, a tak tedy získané hodnoty individuálního rizika pro tyto scénáře mohou být pro některé jedince z populace předimenzované a pro jiné pak i poddimenzované. Pro vyhodnocení závažnosti volby těchto parametrů byly parametry těchto scénářů měněny v následně provedené citlivostní analýze, ze které je zřejmý jejich vliv na výsledné riziko.

Způsob uzemnění	Typ poruchy	Počet poruch na Po vedení za rok n		Počet poruch na všech DTS	Rozsah venkovní/kabelové	Počet	ARC
		Kabel.	Venkov.	za rok	sítě (km)	15	
Komponzovoná	L-N	5	120	20	F0000/200	200/200	
Kompenzovana	Cross L-L	2	6	1	50000/200	2500	0.3
Uzemněná přes	L-N	10	10	1.6	2000/1200	200	0.3
odpor	Cross L-L	0	0	0	3000/1300	200	0.3
Inclosent	L-N	3	20	2	5000/20	250	0
izolovana	Cross L-L	0	4	0.1	5000/20	250	0.3
	L-N	4	20	4.4			0.3
Účinně uzemněná	L-L-N	2	6	0.5	10000/1000	550	0.3
	Cross L-L	0	0	0			0.3

Tab. 6-8 Použitá statistika poruch v distribuční síti

K volbě dotykových scénářů je dále nezbytné zmínit, že v rámci této práce bylo řešeno pouze individuální riziko a nikoli společenské (v souladu s 6.1). Získané výsledky individuálního rizika tak udávají pouze pravděpodobnost úmrtí průměrné osoby z populace. Je zřejmé, že v uvažovaném případě zemniče distribuční trafostanice může při jedné poruše dojít k vícenásobnému dotyku více různých osob s neživými částmi elektrických zařízení a tedy jedna porucha může způsobit i vícenásobné úmrtí v souladu s definicí společenského rizika. Tato práce se zde ovšem omezuje pouze na vyhodnocení individuálního rizika a lze tedy doporučit do budoucna provést další studie zaměřující se na vyhodnocení velikosti společenského rizika pro zemniče distribučních trafostanic. Je také nezbytné zmínit, že pro vyhodnocení bezpečnosti zařízení je vždy nezbytné provést vyhodnocení individuálního rizika a v případě, že při jedné poruchové události může být riziku. Nezbytnost vyhodnocení společenského rizika bude značně odvislá od velikosti populace, která tomuto individuálnímu riziku od jedné poruchové události může být vystavena [37].

Dotykové scénáře byly zvoleny jako

- Ve sprše (např. dotyk ruky armatury a nohy se zemí).
- Dotyk zahradního kohoutku v blízkosti obydlí (tj. v blízkosti domovního zemniče, dotyk ruka nohy).
- Dotyk s kovovým kuchyňským dřezem, či vodovodní armaturou (např. při mytí nádobí aj, dotyková dráha ruka nohy).
- Dotyk vodivých neživých částí pračky (dotyk vnějšího obalu pračky dráha ruce nohy).

- Dotyk vodivých neživých částí elektrického nářadí v blízkosti obydlí (tj. v blízkosti domovního zemniče, např. doma v dílně, vrtačka, bruska aj. dráha ruce nohy, předpoklad přítomnost obuvi).
- Dotyk vodivých neživých částí elektrického nářadí ve větší vzdálenosti od obydlí (tj. je předpoklad překlenutí většího potenciálu v důsledku spojení neživých částí se vzdálenou zemí, např. elektrická sekačka, elektrická míchačka aj. nářadí).

Dotykový scénář			$U_{\rm T/EPR}$	$p_{n}$	<i>p</i> <sub>d</sub> [s]	Dotyková	Okolnosti dotyku	Odpor těla pro	Dráha proudu
		Obuv	[%]	Dotyků za rok	Délka	plocha		% populace	
a)	Sprcha	Ne	30	1000	4	Velká	Mokrý	50%	LHBF
b)	Zahradní kohoutek	Ne	50	100	4	Velká	Mokrý	50%	LHBF
c)	Kuchyňský dřez	Ne	20	3000	4	Velká	Mokrý	50%	LHBF
d)	Pračka	Ne	30	300	4	Velká	Suchý	50%	BHBF
e)	Nářadí, ostatní zařízení	Ano	40	100	4	Velká	Suchý	50%	BHBF
f)	Nářadí vzdálené od zemnících soustav	Ano	80	10	4	Velká	Mokrý	50%	BHBF

Tab. 6-9 Navržené dotykové scénáře pro stanovení individuálního rizika

Pro všechny dotykové scénáře byl odhadnut průměrný počet čtyř sekundových dotyků za rok  $p_n$ . Průměrná délka jednoho dotyku byla pro všechny scénáře zvolena jako 4 s v souladu s popisem dotykových scénářů podle příručky EG-0 [37]. V případě, že to pro daný dotykový scénář přicházelo v úvahu, byla u něj uvažována přítomnost obuvi, jejíž velikost byla s ohledem na výsledky kapitoly 6.4.2 zvolena rovna 1 k $\Omega$ . Dotykovým scénářům byly dále odhadnuty procentuální části nárůstu potenciálu neživých částí U<sub>T/EPR</sub>, kterým by mohla být vystavena postižená osoba. Tyto koeficienty vyjadřují, jakou procentuální část celkového nárůstu potenciálu zemniče U<sub>EPR/LV</sub> lze předpokládat při dotyku neživých částí při daném dotykovém scénáři (6-37). Lze předpokládat, že scénáře dotyku uvnitř obydlí by neměly být příliš nebezpečné v případě správě provedené a funkční ochraně pospojováním. V případové studii byly ovšem zvoleny relativně vysoké hodnoty tohoto koeficientu pro jednotlivé scénáře odpovídající spíše stavu bez, či s nesprávně provedeným ochranným pospojováním. Za nejnebezpečnější pak lze považovat případy, kdy dojde k vytažení ochranného vodiče dále od domovního zemniče, kdy postižená osoba se pak nachází na vzdálené zemi a lze předpokládat překlenutí velké částí vzniklého potenciálu. Tento případ respektuje scénář f). Pro všechny scénáře byla zvolena velká plocha dotyku a odpor pro 50 % populace v souladu s 6.4.2. Pro další zhoršení situace a získání tak konzervativnějších výsledků byly dále pro některé scénáře uvažovány i dotyky s mokrou kůží (což snižuje odpor těla) a dále i nejhorší dotykové dráhy obě ruce obě nohy.

$$U_{\nu T} = \frac{U_{T/EPR}}{100\%} \cdot U_{EPR/LV}$$
 (6-37)

Scénáře byly všechny zvoleny jako v síti nízkého napětí. Pro korektnost by bylo vhodné do vyhodnocení také zahrnout dotykový scénář odborného pracovníka provádějícího činnost na elektrotechnickém zařízení dané distribuční sítě. Je zřejmé, že daný odborný pracovník bude ve výsledku vystaven celkovému riziku většímu, než osoby z řad laické veřejnosti, neboť jeho individuální riziko bude oproti ostatním jedincům navýšené právě o scénář dotyku v rámci jeho pracovní činnosti. Zde je ovšem vhodné zmínit, že limity pro individuální rizika pro vybrané pracovní činnosti mohou být i větší než pro laickou veřejnost (např. v případě pracovníků jaderných elektráren [36]). V případě těchto pracovníků se také mnohdy předpokládá užití speciálních

ochranných pomůcek a postupů, které vedou k dalšímu snížení podstupovaného rizika. Stanovené hodnoty rizika tak zde vyjadřují pouze riziko podstupované laickou veřejností. Pro korektnost by pak bylo vhodné vyhodnocovat tato rizika odděleně – jedno pro osobu z laické veřejnosti, druhé pro odborného pracovníka – s odpovídajícími limity individuálního rizika.

Ze znalosti statistických parametrů dotyku i výskytu poruch tak je možné stanovit pravděpodobnost koincidence  $P_{coic}$  pro jednotlivé scénáře a typy poruch viz Tab. 6-10. Ze znalosti dotykových napětí  $U_{vT}$  pak pro jednotlivé dotykové scénáře byly podle postupu kapitoly 6.4 stanoveny pravděpodobnosti fibrilace a podle vztahu (6-28) pak těmto scénářům byly dopočteny velikosti individuálního rizika  $P_{IR}$  (dále značená také jako  $P_{risk}$ ). Je předpoklad, že daná průměrná osoba může být v kontaktu pouze s jedním z uvedených zařízení a jevy a) až f) jsou tak vzájemně vylučující se. Obdobně tak je předpokládáno, že typy poruch (L-N, Cross L-L-N a L-N s připojeným odporníkem) jsou jevy vzájemně se vylučující, a tedy nemohou nastat současně. Velikost individuálního rizika pro zemnič v daném typu distribuční sítě (kompenzovaná, izolovaná atd.) pak je tedy součtem pravděpodobností úmrtí při jednotlivých dotykových scénářích a při jednotlivých typech poruch a je uvedena pro uvedenou zjednodušenou sít provozovanou jako kompenzovanou v posledním sloupci Tab. 6-10 jako  $P_{risk}$ .

V Tab. 6-10 veličina  $U_{\rm HB}$  značí velikost napětí na postižené osobě (jedná se o hodnotu napětí působící přímo na lidské tělo, tj. snížená hodnota dotykového napětí  $U_{\rm vT}$  o úbytek napětí na přídavném odporu obuvi zjištěný podle iteračního postupu podle 6.2) a  $I_{\rm HB}$  značí velikost proudu lidským tělem (uvedená hodnota není přepočítaná koeficientem *F* ( 6-25 ) pro různou dráhu proudu tělem).

Typ poruchy		<b>U</b> EPR/LV	Dotykový	<b>U</b> vт	<b>U</b> нв	<b>t</b> fault	<b>І</b> нв	Pcoic	<b>P</b> <sub>fib</sub>	PIR	<b>P</b> risk
		[V]	scénář	[V]	[V]	[s]	[mA]	[-]	[-]	[-]	Sum
			a)	8.20	8.20		5.80	3.05E-04	4.17E-17	1.27E-20	
			b)	13.66	13.66		9.66	3.05E-05	1.13E-11	3.45E-16	
	z	27.22	c)	5.47	5.47	1200	3.87	9.16E-04	2.87E-22	2.63E-25	
	ن	27.33	d)	8.20	8.20	1200	6.31	9.16E-05	2.41E-15	2.21E-19	
aná			e)	10.93	7.58		5.83	3.05E-05	4.17E-17	1.27E-21	
vozi			f)	21.86	13.16		15.13	3.05E-06	1.12E-07	3.42E-13	
uper	Cross L-L-N	1314.68	a)	394.40	394.40	0.3	634.16	7.09E-08	3.61E-01	2.56E-08	5.52E-08
Kon			b)	657.34	657.34		1296.07	7.09E-09	9.79E-01	6.94E-09	
			c)	262.94	262.94		350.62	2.13E-07	9.62E-03	2.05E-09	
			d)	394.40	394.40		1030.52	2.13E-08	8.97E-01	1.91E-08	
			e)	525.87	239.01		498.87	7.09E-09	1.22E-01	8.67E-10	
			f)	1051.74	414.07		1109.07	7.09E-10	9.35E-01	6.63E-10	
			a)	16.12	16.12		11.40	1.27E-06	3.32E-12	4.21E-18	
iná + istoi			b)	26.87	26.87		19.12	1.27E-07	2.85E-08	3.62E-15	
zova / rez	z	F0 74	c)	10.75	10.75		7.60	3.81E-06	6.24E-16	2.38E-21	
penz	ذ	55.74	d)	16.12	16.12	1	12.40	3.81E-07	1.56E-11	5.94E-18	
Yom(			e)	21.50	14.90		11.46	1.27E-07	3.32E-12	4.21E-19	
- L			f)	42.99	25.86		29.80	1.27E-08	9.39E-06	1.19E-13	

Tab. 6-10 Dílčí výsledky výpočtu individuálního rizika pro kompenzovanou síť

Souhrnné výsledky pro všechny způsoby provozu distribuční sítě jsou uvedeny v Tab. 6-11. Ze získaných výsledků je patrné, že pro zvolené parametry výpočtu by zemnič nevyhověl pravděpodobnostnímu vyhodnocení pouze v případě, že by se jednalo o účinně uzemněnou síť. V tomto případě vypočtené riziko spadá do ALARA oblasti a v souladu s postupy EG-0 i BS EN 50522 by tak bylo nezbytné provést analýzu přínosů a nákladů a zhodnotit tak efektivnost vynaložených prostředků na eliminaci rizika. Ze získaných výsledků je dále patrné, že např. v případě kompenzované sítě je hlavním zdrojem rizika vícefázová porucha namísto v současnosti vyhodnocované jednofázové.

Porucha a scénář		SE	IE	ER	RES	RES+R		
	a)	5.79E-07	5.19E-08	1.50E-09	1.27E-20	4.22E-18		
	b)	1.39E-07	7.69E-08	3.77E-08	3.45E-16	3.96E-15		
LN	C)	5.63E-08	2.72E-09	2.44E-12	2.63E-25	2.38E-21		
L-IN	d)	3.90E-07	1.12E-07	3.13E-08	2.21E-19	6.16E-18		
	e)	2.04E-08	7.68E-09	6.71E-11	1.27E-21	4.22E-19		
	f)	1.34E-08	1.04E-08	3.59E-09	3.42E-13	4.61E-13		
	a)	0	2.56E-08	0	2.56E-08	х		
	b)	0	6.94E-09	0	6.94E-09	х		
	C)	0	2.05E-09	0	2.05E-09	х		
CIOSS L-L-IN	d)	0	1.91E-08	0	1.91E-08	х		
	e)	0	8.67E-10	0	8.67E-10	х		
	f)	0	6.63E-10	0	6.63E-10	х		
	a)	3.55E-09	0	0	0	х		
	b)	1.13E-08	0	0	0	х		
	c)	2.77E-11	0	0	0	х		
L-L-N	d)	1.69E-08	0	0	0	х		
	e)	1.22E-10	0	0	0	х		
	f)	9.40E-10	0	0	0	х		
Prisk suma		1.23E-06	3.17E-07	7.41E-08	5.52	E-08		
*SE – účinně uzemněná, IE – izolovaná, ER – uzemněná přes odpor, RES kompenzovaná, RES+R připnutí odporníku v kompenzované síti								

Tab. 6-11 Velikosti dílčích a souhrnných individuálních rizik Prisk pro jednotlivé typy sítě

*Pozn. V Tab. 6-11 se vyskytuje mnoho nul. To je způsobeno nulovým počtem výskytu daných typů poruch pro danou síť.* 

#### 6.6.2 Citlivostní analýza pravděpodobnostního přístupu

Jedním z problémů užití pravděpodobnostního přístupu je v současnosti neznalost potřebných statistických parametrů popisující chování osob, výskyt poruch atd. Dalším problémem pravděpodobnostního přístupu je stochasticita chování všech dalších rozličných parametr majících vliv na počítané riziko (jako je variace rezistivity půdy v důsledku proměnného počasí, výskyt nedokonalých/nekovových poruch, variabilita času vypnutí poruch, místo výskytu poruchy atp.). Jak bylo zmíněno dříve, tak jedním ze způsobů, jak by bylo možné k tomuto problému přistupovat je skrze znalost odpovídajících pravděpodobnostních rozložení s následným provedením rozsáhlé simulace Monte Carlo. Pro získání alespoň částečné představy lze k problému neznalosti chování jednotlivých parametrů přistoupit i zjednodušeně provedením prosté citlivostní analýzy

s vyhodnocením váhy vlivu variance různých parametrů na výsledné riziko. Za tímto účelem byla provedena citlivostní analýza s obměnou některých parametrů. Byl testován vliv parametrů ovlivňujících jak výpočet pravděpodobnosti koincidence, tak i výpočet pravděpodobnosti fibrilace.

Pro pravděpodobnost koincidence byly obměňovány parametry definující chování průměrné osoby (jako  $p_d$  a  $p_n$ ) a parametry definující statistiku poruchovosti sítě (jako  $f_n$  a  $f_d \sim t_{clear}$ ). Pro výpočet pravděpodobnosti fibrilace byl testován vliv parametrů majících vliv na velikosti dotykových napětí jako např. vliv společného či odděleného uzemnění (pomocí koeficientu *EPR*<sub>LV</sub>/*EPR*<sub>MV</sub>), vliv přítomnosti připojených kabelových stínění (pomocí redukčního činitele *r*), vliv různé délky vývodu na kterém se vyskytuje postižená DTS ( $d_{feeder}$ ) či vliv nedokonalé poruchy modelovaný přídavným odporem  $R_f$  (např. jiskření aj.). Vliv změny dotykových napětí byl ještě zkoumán skrze obměnu rezistivity půdy  $\rho_s$  a dále pak pomocí přímé prosté změny velikosti zemního odporu  $R_E$  a i  $R_{DTS}$  samostatně, a také prostřednictvím změny procentuálních částí velikostí dotykových napětí z celkového potenciálu pro jednotlivé dotykové scénáře  $U_{T/EPR}$  podle Tab. 6-9. Citlivostní analýza byla provedena tak, že byl měněn vždy pouze jeden požadovaný parametr a zbylé zůstaly neměnné s velikostí odpovídající základnímu stavu modelu sítě podle předchozí kapitoly 6.6.1. Následuje výpis měněných parametrů s uvedením měněného rozmezí.

- Četnost výskytu poruch f<sub>n</sub>, 20-200 % hodnoty případové studie.
- Délka vypnutí poruchy *t*<sub>clear</sub> (~*f*<sub>d</sub>), 30-500 % času případové studie.
- Četnost dotyků průměrné osoby *p*<sub>n</sub>, 20-200 % hodnot případové studie (měněno pro všech 6 dotykových scénářů najednou).
- Délka dotyku průměrné osoby p<sub>d</sub>, 20-200 % hodnot případové studie (měněno pro všech 6 dotykových scénářů najednou, jelikož tato hodnota byla pro všechny scénáře stejná 4 s, tak byla měněna od 2 do 6 s).
- Vliv společného či odděleného uzemnění  $EPR_{LV}/EPR_{MV}$  od 50 do 100 %, pro základní stav případové studie bylo počítáno se společným uzemněním, tedy = 100 %.
- Redukční činitel *r* byl měněn od 0.01 do 1, v základním stavu studie byl roven 1.
- Délka vývodu *d*<sub>feeder</sub> byla měněna od 0.5 do 50 km, pro základní stavu studie byla 20 km.
- Velikost přídavného odporu poruchy *R*<sub>f</sub> byla měněna od 0 do 5 Ω, v základním stavu studie rovna 0 Ω.
- Rezistivita půdy  $\rho_s$  byla měněna v rozsahu od 100 do 5000 Ωm, v základním stavu studie 100 Ωm.
- Velikost zemního odporu DTS R<sub>DTS</sub> byla měněna od 20 do 200 % hodnot případové studie.
- Velikost celkového zemního odporu  $R_{\rm E}$  byla měněna od 20 do 200 % hodnot případové studie.
- Procentuální část překlenutého potenciálu při dotykových scénářích U<sub>T/EPR</sub> od 20 do 200 % hodnot případové studie (jelikož U<sub>T/EPR</sub> vyjadřuje v procentech část celkového nárůstu potenciálu zemniče U<sub>EPR/LV</sub>, tak změna tohoto parametru byla zastropována tak, aby nepřesáhla 100 %, např. v případě dotykového scénáře *f*).

Je vhodné zmínit, že velikost rezistivity půdy do výpočtu vstupovala jednak pro výpočet samotného odporu uzemnění a tedy i výsledného poruchového proudu při řešení pomocí souměrných složek, a zároveň také jako velikost přídavné rezistance pro dotykové scénáře s obuví podle Obr. 6-7 a ( 6-20 ). Naopak v případě změny samotného odporu uzemnění  $R_{\text{DTS}}$  a  $R_{\text{E}}$  měl tento parametr vliv pouze na velikost poruchového proudu a samotnou velikost nárůstu potenciálu zemniče, nicméně pro výpočet přídavné rezistance byla použita velikost rezistivity půdy 100  $\Omega$ m, tedy pro základní stav případové studie. Konečně pak změna pouze procentuálních koeficientů

velikosti dotykových napětí  $U_{T/EPR}$  měla vliv pouze na samotné velikosti dotykových napětí při neměnné velkosti zemního odporu, a tedy i velikosti poruchového proudu.

Výsledky provedené citlivostní analýzy pro kompenzovanou síť jsou vyobrazeny na Obr. 6-24 a Obr. 6-25. Výsledky jsou rozděleny do dvou grafů podle toho, zda byly parametry měněny procentuálně, či absolutně (s výjimkou času vypnutí poruchy  $t_{clear}$ ).



Obr. 6-24 Výsledky citlivostní analýzy, procentuálně měněné vstupní parametry výpočtu, kompenzovaná síť

Výsledné hodnoty rizika v Obr. 6-24 jsou procentuálně vztaženy k výsledné hodnotě rizika kompenzované sítě podle případové studie, tedy 100 % odpovídá riziku 5.52 $\cdot$ 10<sup>-8</sup> podle Tab. 6-11. Z průběhů křivek  $f_n$ ,  $p_n$  a  $p_d$  lze pak pozorovat vliv změny parametrů majících vliv pouze na pravděpodobnost koincidence. Z průběhu křivek pro  $p_n$  a  $p_d$  je zřejmé, že výsledné riziko je v souladu se vztahem ( 6-30 ), potažmo ( 6-34 ) přímo úměrné chování daného průměrného jedince. V porovnání s dalšími měněnými parametry je pak patrné, že změna těchto parametrů má na výsledky mírně menší vliv než v případě ostatních parametrů ovlivňujících pravděpodobnost fibrilace. Pakliže by tedy parametry dotykových scénářů pro průměrnou osobu byly zvoleny nevhodně, tak se jeví, že jejich nevhodná volba nebude mít na získané výsledky tak značný vliv, jako v případě ostatních parametrů souvisejících s výpočtem pravděpodobnosti fibrilace. Obdobný závěr je možné stanovit také pro parametr četnosti poruch  $f_n$ , který v Obr. 6-24 kopíruje průběh křivky  $p_n$ , neboť jeho změna ve stejných mezích jako pro  $p_n$  má na výsledek vztahu ( 6-30 ) úplně stejný vliv.

V uvedeném grafu Obr. 6-24 je dále vynesen průběh pro změnu procentuální části překlenovaného potenciálu pro jednotlivé dotykové scénáře a průběh pro změnu celkového odporu zemniče  $R_E$ . Je relativně zajímavé, že oba průběhy kopírují prakticky stejné hodnoty, ač tento jev prakticky nemá stejnou fyzikální podstatu. K tomuto jevu nejspíše dochází jednak v důsledku zvolených mezí (20-200 %) kdy ještě nedochází k výraznějšímu zastropování procentuálních hodnot potenciálů  $U_{T/EPR}$  na 100 % a dále také v důsledku dominantního vlivu velikosti odporu uzemnění na výsledný poruchový proud a tak vzniklá dotyková napětí. Při pohledu na tyto dvě

171

křivky je nezbytné si uvědomit, že velikost odporu vstupuje do výpočtu jak při výpočtu samotného nárůstu potenciálu zemniče, tak i při výpočtu poruchových proudů, kdy se již nejedná o jednoduchou závislost, ze které by byla zřejmá jednoduchá úměra mezi  $R_E$  a výsledným nárůstem potenciálu zemniče. Ze samotných hodnot spočteného rizika je pak zřejmé, že volba koeficientů  $U_{T/EPR}$  dotykových scénářů má na výsledné riziko značný vliv. Stejně tak větší změny celkového odporu uzemnění v průběhu životnosti zemniče mají značný vliv na hodnoty individuálního rizika. Takto větší změny celkového odporu uzemnění lze předpokládat např. v důsledku koroze materiálu zemničů, neúmyslného rozpojení středního (ochranného) vodiče v síti NN, variace rezistivity půdy v rozsáhlejší oblasti atp. Pro správnou aplikaci pravděpodobnostního přístupu by byla vhodná detailnější analýza vzniklých rozdílů potenciálů u jednotlivých dotykových scénářů s následným zpřesněním koeficientů  $U_{T/EPR}$ . Je zřejmé, že např. změně o 50 % těchto koeficientů odpovídá změna rizika o 100-200 %, přičemž je nezbytné si uvědomit, že změna o 50 % je vztažená k procentuální hodnotě tohoto koeficientu (tedy např. pro scénář *a*) změna o 50 % znamená nárůst  $U_{T/EPR}$  z 30 na 45 % nárůstu potenciálu zemniče).

Posledním nediskutovaným parametrem v Obr. 6-24 je odpor uzemnění samotné trafostanice  $R_{\rm DTS}$ . Na změnu tohoto parametru lze pohlížet ve světle více různých okolností. Prvním může být např. variace rezistivity půdy v důsledku proměnného počasí, či také korozí materiálu s jeho stářím. Dalším možným pohledem na změnu tohoto parametru je právě vliv nepřesnosti stanovení odporu uzemnění jeho nevhodným modelováním. Chyby při stanovování zemního odporu s ohledem na použitou výpočtovou metodu byly prezentovány a souhrnně kvantifikovány v kapitole 5.4. Při užití pravděpodobnostního přístupu na zemniče v distribučních sítích lze předpokládat, že projektant při návrhu zemniče bude postupovat obdobně jako doposud - tedy ze změřených hodnot rezistivity půdy stanoví model půdy, nejspíše pouze homogenní, pro výpočet celkového nárůstu potenciálu zemniče EPR použije pouze zjednodušených analytických vztahů, z takto určeného EPR pomocí koeficientů (1/2) stanoví velikost dotykového napětí a jemu odpovídající velikost individuálního rizika. Pakliže by se ovšem pokusil provést přesnější modelování takovéhoto zemniče (užití pokročilejších metod spolu s vícevrstvým modelem půdy), tak by mohl dosáhnout výsledků poněkud odlišných od předchozího zjednodušeného postupu. V rámci souhrnné kapitoly 5.4.2 pak bylo tedy stanoveno, že v případě použití zjednodušených vztahů lze předpokládat rozdíl stanovení zemního odporu oproti přesnějšímu modelování přibližně  $dR_{\text{DTS}}$  -30 a +20 % (až +60 při použití i hloubkově nezávislých vztahů). Z průběhu změny individuálního rizika při variaci velikosti odporu uzemnění samotné trafostanice R<sub>DTS</sub> této chybě určení odporu odpovídá změna rizika v porovnání s základním modelem případové studie přibližně do 40 %. Pakliže by se výsledky základního stavu případové studie pohybovaly v jiné části dané křivky (např. stav kdy by základní stav byl pro 40 % na dané křivce), by pak stejné změně o -30 a +20 % R<sub>DTS</sub> odpovídaly změny i větší až do 70 % změny rizika, kdy průběh chyby je pro tyto hodnoty zemního odporu  $R_{\text{DTS}}$ strmější.

Z porovnání průběhů změny rizika pro odpory  $R_E$  a  $R_{DTS}$  je zřejmé, že změna  $R_{DTS}$  je značně utlumena zavedeným předpokladem, že odpor ochranného vodiče sítě nízkého napětí může být maximálně 2  $\Omega$  podle (6-32). Je nezbytné zmínit, že daná relativně malá změna výsledného rizika při určení odporu uzemnění jeho nepřesným modelováním může vést i na větší změny výsledného rizika a to pro případy kdy zemní odpor ochranného vodiče sítě NN nebude takto malý. Tento stav může nastat například v případě kdy NN sít má malý rozsah – pouze počet jednotek obydlí atp.) V tomto případě lze aplikovat získané nepřesnosti modelování zemniče na průběh rizika při změně celkového odporu uzemnění  $R_E$ . Zde je patrné, že uvedené nepřesnosti -30 a +20 % pak odpovídá chyba určení individuálního rizika přibližně ±80 %. S těmito uvedenými mírami nepřesnosti určení výsledného rizika v důsledku zjednodušeného modelování a výpočtu zemničů je tedy vhodné počítat. Přestože jsou zemniče před uvedením do provozu měřeny, zda dosahují požadovaných parametrů [3], [122], tak měření podle uvedených referencí umožnují tuto chybu jednoduše vykompenzovat využitím benevolentnějších výsledků měření. Např. v případě měření dotykových napětí je podle [3] dovoleno vyhodnocovat zatížené (efektivní) dotykové napětí s odporem 2.5 k $\Omega$  namísto v projektu řešeným předpokládanými dotykovým napětím. Zatížená (efektivní) dotyková napětí jsou v porovnání s předpokládanými menší v důsledku vzájemného ovlivňování potenciálů v půdě obdobně jako by se v půdě nacházelo více zemničů se stejným potenciálem. Dalším prováděným měřením těchto zemničů je měření jejich zemního odporu. Při tomto měření, pokud je provedeno správně, by mělo být možné alespoň částečně případné nesrovnalosti odhalit, nicméně je nezbytné zmínit, že mnohdy může být měření pouze celkový odpor uzemnění  $R_E$  a nikoli dílčí odpory  $R_{DTS}$  a  $R_{PNE}$  (zemní odpor ochranného vodiče) samostatně. Další možnou nesrovnalostí zde může být vliv nehomogenního složení půdy, kdy při nevhodném rozmístění tří či čtyř-vodičového měření zemního odporu do oblastí s rozdílnou rezistivitou půdy mohou tyto metody udávat nepřesné výsledky.

V druhém obrázku Obr. 6-25 jsou vyneseny výsledky citlivostní analýzy parametrů, které byly měněny v mezích definovaných jejich absolutními hodnotami. Velikost spočteného rizika pro změnu těchto parametrů je pak vynesena v absolutních hodnotách. V uvedeném obrázku jsou pro názornost také podbarveny oblasti netolerovatelného rizika a akceptovatelného rizika. Následuje krátký komentář k jednotlivým parametrům měněným v této citlivostní analýze.

- Společné a oddělené uzemnění EPR<sub>LV</sub>/EPR<sub>MV</sub>. Z výsledků je zřejmé, že pakliže by bylo možné odděleným uzemněním dosáhnout přenosu pouze 50 % celkového nárůstu potenciálu zemniče vysokého napětí na zemnič nízkého napětí, tak by bylo možné dosáhnout redukce výsledného rizika o více jak 1.5 řádu. Budování odděleného uzemnění tak může pomoci redukovat výsledné riziko ovšem za cenu budování dvou oddělených zemničů, kdy by bylo diskutabilní, zda nevynaložit prostředky na zbudování jednoho zemniče většího.
- Redukční faktor r. Redukční faktor vyjadřuje vliv např. připojeného kabelového stínění a tedy odvedení částí poruchového proudu skrze síť vysokého napětí. Z výsledků je zřejmé, že nízký redukční faktor může mít značný pozitivní vliv na velikost rizika vyhodnocované zemnící soustavy. Z pohledu bezpečnosti zemniče se tak jeví provedení propojení stínění kabelů či zemnících lan ze sítě VN za žádoucí. Přestože byl redukční faktor měněn v rozsahu od 0.01 do 1 tak v grafu je zobrazena pouze část od 0.5 do 1 z důvodu vhodného rozsahu měřítka svislé osy a tedy čitelnosti grafu. Z průběhu křivky pro redukční faktor je zřejmé, že pro jeho hodnoty menší jak 0.5 by bylo možné dosáhnout snížení rizika o několik řádů. Při propojení stínění kabelů na zemnič DTS je ovšem vhodné také zmínit, že toto by vedlo také k nárůstu počtu poruch, tedy *f*<sub>n</sub>, kdy by se v síti NN mohlo vyskytovat více rizikových událostí v důsledku zavlečení nárůstu potenciálu ze sítě VN do sítě NN. Nicméně z průběhu koeficientu *f*<sub>n</sub> v Obr. 6-24 je zřejmé, že tento má na změnu rizika spíše menší vliv než předpokládatelná změna redukčního faktoru.
- *R*<sub>f</sub> + *d*<sub>feeder</sub>. Velikost přídavného odporu poruchy a také délka postiženého vývodu měly pro jejich zvolené rozmezí hodnot na výsledné riziko obě obdobný vliv. V obou případech změna těchto parametrů vede s jejich rostoucí velikostí ke zvětšující se ohmické částí poruchové smyčky a tedy ve výsledku ke snižování poruchového proudu. Je nezbytné zmínit, že obvykle ani jednu z těchto veličin projektant nemůže nijak ovlivnit, nicméně je zřejmé, že tyto parametry mohou mít vliv na změnu výsledného rizika přibližně až

o jednotky řádů. Tedy např. fakt, že ne všechny zemní spojení lze předpokládat jako čistě kovové, ale jako vyskytující se s určitým odporem poruchy, může tento přídavný odpor poruchy výsledné riziko značně snížit ve prospěch postižené osoby.

- Čas vypnutí poruchy  $t_{clear}$ . Tato veličina nebyla uvedena v předchozím grafu společně s ostatními veličinami majícími přímý vliv na výpočet pravděpodobnosti koincidence z důvodu jejího současného vlivu na počítanou pravděpodobnost fibrilace. Ve většině případů byla délka průtoku proudu postiženou osobou uvažována právě rovná času vypnutí ochran, s výjimkou kompenzované sítě, kde byla uvažována rovná délce dotyku podle Tab. 6-9, tj. 4 s. Čas vypnutí ochran byl v rámci citlivostní analýzy měněn od přibližně 1/3 až po 5-ti násobek základní hodnoty pro případovou studii. Jedná se tak o časy vypnutí poruch od 100 ms až po 5 s (pro sítě s rychlým vypínáním poruch) až po 1 hodinu a 40 min v případě sítě kompenzované. Pro v grafu uvedenou kompenzovanou síť se pak pro jednofázová zemní spojení jedná o poruchy v délce trvání od 6 minut do 100 minut a pro vícefázové poruchy pak od 100 ms do 1.5 s. Z výsledků analýzy je pak zřejmé, že délka průchodu proudu má na získané riziko vliv přibližně v řádu 1 až 2 řádů. K průběhu tohoto rizika je také nezbytné zmínit, že pro délku trvání poruchy delší jak přibližně 300 % došlo k saturování pravděpodobnosti fibrilace, která již pro delší časy vypnutí zůstává pořád rovna 1 a výsledné riziko dále roste jen v důsledku nárůstu pravděpodobnosti koincidence. Z průběhu před a po troj násobku tohoto času je tak zřejmý silnější vliv skrze pravděpodobnost fibrilace než skrze pravděpodobnost koincidence.
- Posledním měněným parametrem byla rezistivita půdy  $\rho_s$ . Z průběhu změny této veličiny je zřejmá silná závislost velikosti rizika na velikosti rezistivity půdy a to pro řešenou kompenzovanou síť až o 4.5 řádu. Je zde otázka, jaké jsou očekávatelné změny rezistivity půdy v rámci např. vlivu počasí. Např. Obr. 5-16 zde uvádí změnu rezistivity půdy v důsledku změny vlhkosti v půdě či poklesu půdní teploty z +10 na -5 °C přibližně až 10-ti násobnou. Je ovšem předpokládatelné, že z tohoto hlediska se bude jednat spíše o změnu parametrů povrchové vrstvy půdy než o stejnou změnu parametrů skrz celkovou hloubkou. Je tedy zřejmé, že korektnímu určení velikosti rezistivity půdy v případě užití pravděpodobnostního přístupu je nezbytné věnovat velkou pozornost a při návrhu také zohlednit případné možné změny rezistivity půdy. Změnu tohoto parametru je také vhodné vnímat např. s ohledem na postupnou změnu klimatu v průběhu životnosti zemniče, kdy v důsledku vysychání půdy může pro daný zemnič docházet k nárůstu projektovaného rizika. Na křivce průběhu tohoto rizika jsou pak zřejmé tři oblasti s rozdílným průběhem vypočteného rizika. První oblast od 100 do 200 Ωm představuje stav, kde podle vztahu (6-32) je uvažován zemní odpor PEN vodiče roven 2  $\Omega$ . Dále pak pro rezistivity půdy větší jak 200 Ωm byl již použit vztah (6-33) na rezistivitě půdy závislý. Druhá oblast pak navazuje na první a představuje stav, kdy postupně dochází k saturování pravděpodobnosti fibrilace na hodnotu 1 při vícefázové poruše Cross L-L-N. Pak s dalším nárůstem rezistivity půdy dochází k dalšímu prudkému nárůstu individuálního rizika v důsledku nárůstu rizika i při jednofázové poruše - zemním spojení a pro rezistivitu půdy větší jak přibližně 4 kΩm již dochází k saturování pravděpodobnosti fibrilace i v případě jednofázové zemní poruchy. Výsledné riziko se pak zde rovná celkové pravděpodobnosti koincidence všech dotykových scénářů při všech dotykových poruchách, tj. cca 0.00138.



Obr. 6-25 Výsledky citlivostní analýzy, absolutně měněné parametry, kompenzovaná síť

#### 6.6.3 Shrnutí

Cílem práce byla analýza použití pravděpodobnostního přístupu pro vyhodnocení bezpečnosti zemničů v distribučních sítích. Za tímto účelem byla v rámci předchozích dvou kapitol provedena analýza chování individuálního rizika zemniče v zjednodušeném modelu distribuční sítě VN. V rámci této práce byly prezentovány výsledky pro kompenzovanou soustavu. Výsledky pro další způsoby uzemnění středu zdroje byly prezentovány v rámci publikace z pracovní skupiny JWG Cigre B3.35/CIRED [102] na jejíž tvorbě se autor spolupodílel.

Ze získaných výsledků je patrné, že pravděpodobnostní přístup umožňuje mnohem lépe kvantifikovat skutečné riziko. Je zřejmé, že současný přístup vyhodnocování pouze jednofázových poruch může být nedostatečný a to především v případech, kdyby se v síti vyskytoval statisticky větší počet dvojitých zemní spojení. Prakticky nejmarkantnější je situace právě v případě kompenzované sítě, kdy spočtená hodnota rizika v podstatě odpovídá pouze riziku od těchto dvojitých zemních spojení a to ve většině případů i při uvedených změnách parametrů v citlivostní analýze.

Pro korektní posouzení vlivu rozličných parametrů majících vliv na počítané riziko by bylo vhodné disponovat odpovídajícími statistikami k nimž by bylo možné vytvořit pravděpodobnostní rozložení a posoudit tak lépe intervaly ve kterých by se riziko mohlo pohybovat. Při spokojení se s jednodušším přístupem skrze citlivostní analýzu lze očekávat, že spočtené riziko se v průběhu životnosti řešeného zemniče může měnit přibližně o 1 a 2 řády. Dále pak zvolením nevhodné modelovací metody zemnících soustav bylo v souladu s výsledky kapitoly 5.4.2 zjištěno, že projektantem by mohlo být riziko při návrhu pře/pod-dimenzováno přibližně o 40 % (v extrémnějších případech pak i až 80 %), čemuž odpovídá změna o přibližně polovinu jednoho řádu. Při uvážení možnosti kombinování změny všech uvažovaných parametrů se pak lze domnívat, že vypočtené riziko při návrhu zemniče se může od skutečného v průběhu životnosti zemniče zcela jednoduše pohybovat v intervalu nejistoty přibližně o 1-2 řády. Na základě těchto zjištění tak lze buďto doporučit tuto nejistotu uvažovat při samotném návrhu, nebo provést odpovídající citlivostní analýzu, ze které by mohlo být patrné, že předpokládatelná změna vstupních parametrů nepovede k takovýmto změnám vypočteného rizika.

Uvedenou nejistotu určení individuálního rizika lze předpokládat i pro jiné způsoby uzemnění uzlu sítě. Výsledky pro ostatní způsoby uzemnění uzlu sítě byly publikovány v brožuře [102].

## 7 Závěr

Všeobecná metodika pravděpodobnostního přístupu pro hodnocení zemnících soustav je dnes již relativně ucelená a byla již v některých zemích přijata i na úrovni standardů. Ač tyto standardy se striktně proti užití této metodiky pro vyhodnocení rizika zemničů v distribučních soustavách nevymezují, tak byla její aplikace zatím vždy prezentována na uzemnění zařízení vysokého a velmi vysokého napětí, především pak z přenosové soustavy. Cílem práce tak byla analýza možného použití tohoto přístupu i na zemniče v distribučních soustavách. Je relativně zřejmé, že pro zemniče většiny zařízení v distribučních sítích lze využít postupu obdobného jako pro zařízení přenosové soustavy, ovšem jednou z problémových oblastí jsou zde zemniče distribučních trafostanic. V tomto případě bývají zemniče nejčastěji zbudovány jako společné propojující zemniče strany vysokého napětí transformátoru spolu se zemněním distribuční sítě nízkého napětí. Toto společné uzemnění může z hlediska kvantifikace rizika znamenat značný rozdíl oproti ostatním vysokonapěťovým zemničům, neboť skrze toto společné uzemnění může docházet k zavlečení potenciálu při poruše ze sítě vysokého napětí do sítě nízkého napětí. V síti nízkého napětí pak tomuto zvýšenému potenciálu mohou být vystaveny osoby z laické veřejnosti, které si jimi podstupované riziko ani nemusí uvědomovat. Při dalším uvážení relativně vysoké četnosti dotyku neživých částí zařízení v sítích nízkého napětí laickou veřejností je pak zřejmé, že podstupované riziko laickou veřejností může být i relativně velké a je nezbytné mu věnovat při návrhu zemniče náležitou pozornost.

Cílem práce tak nebyla ani tak tvorba samotné metodiky pravděpodobnostního výpočtu, jako aplikace dosavadních publikovaných přístupů právě na vyhodnocení rizika zemniče v distribuční síti, speciálně pak se společným uzemněním VN i NN strany distribuční trafostanice. Za účelem aplikace pravděpodobnostního přístupu na zemniče v distribuční síti/distribuční trafostanice tak byl reprodukován současný publikovaný pravděpodobnostní postup výpočtu rizika zemničů a jeho jednotlivé dílčí kroky byly podrobeny analýze na možná zjednodušení, úskalí či bylo provedeno porovnání výsledků podle různých přístupů. Výstupem práce je tak souhrn doporučení spolu s prezentovaným příkladem užití pravděpodobnostního přístupu pro kvantifikaci rizika zemniče distribuční trafostanice v provedené případové studii. Celkem tak bylo zdokumentováno 5 oblastí se stanovenými závěry a doporučeními pro budoucí užití pravděpodobnostního přístupu:

- Z porovnání publikovaných vztahů pro výpočet individuálního rizika se jeví jako vhodnější vztah podle Australské příručky EG-0 (6-30), neboť tento umožňuje přesněji modelovat pravděpodobnost koincidence právě i pro dlouhé trvání poruch, jakými mohou být zemní spojení. V případě zemničů v sítích chráněných rychlými nadproudovými ochranami pak je možné použít i vztah podle britského standardu BS EN 50522, který pro tyto krátké časy dosahuje výsledků obdobných jako uvedený (6-30).
- 2. Pro kvantifikování rizika je nezbytné výpočtem stanovit pravděpodobnost fibrilace pro daný dotykových scénář. Tento výpočet je relativně komplikovanou záležitostí s jediným správným řešením skrze simulaci Monte Carlo, která dokáže postihnout závislosti různých stochasticky se chovajících veličin výpočtu (fibrilace, odpor těla, obuvi aj.). Z provedené analýzy výpočtu pravděpodobnosti fibrilace vyplývá, že použitím křivek fibrilace c3 a c4, velikostí odporu lidského těla pro 50 % populace, dráhy proudu levá ruka obě nohy a případného odpor obuvi rovnému 1 kΩ lze docílit výsledků relativně blízkých, či konzervativnějších než při použití korektnější metodiky založené na váhované metodě Monte Carlo. Ač pravý přínos tohoto zjištění nemusí být úplně na první pohled zřejmý, tak toto zjednodušení v podstatě umožňuje i relativně přesný pravděpodobnostní výpočet

provést prakticky "na papíře" bez nutnosti užití specializovaného softwaru (např. zmíněný Argon). Pokud budou známy funkční předpisy proložených křivek c3, c4 a křivky odporu těla pro 50 % populace, je z těchto možné odečíst příslušné hodnoty pro daný čas působení a velikost dotykového napětí, následně z jednoduchých vztahů stanovit parametry logaritmicko-normálního rozdělení (střední hodnota a rozptyl) a ve třetím posledním kroku pak určit pravděpodobnost fibrilace výpočtem hodnoty distribuční funkce rozložení fibrilace. Zjednodušený postup je vhodný pro užití v normě jako postup alternativní k použití specializovaného softwaru, případně pro ověření získaných výsledků.

- 3. Pro kvantifikaci rizika zaneseného potenciálu do sítě NN byly nově vydefinovány očekávatelné dotykové scénáře. Parametry těchto scénářů mohou posloužit jako výchozí hodnoty a mohou být v budoucnu zpřesněny na základě detailnějšího rozboru chování osob. Z provedené citlivostní analýzy se jeví, že parametry koincidence dotyku mají na výsledné riziko menší vliv než parametry související s pravděpodobnostní fibrilace v důsledku jejich nelineárních závislostí.
- 4. Byla provedena citlivostní analýza stěžejních parametrů pravděpodobnostního výpočtu, které mají vliv na velikosti spočteného rizika. Z výsledků vyplývá, že změna některých parametrů může mít na výsledné riziko značný vliv a lze tedy doporučit buďto pro každý navrhovaný zemnič provést citlivostní analýzu, nebo při návrhu počítat s tím, že spočtené riziko se může s měnícím se počastím a také v průběhu životnosti zemniče měnit průměrně o 1-2 dekadické řády.
- 5. Vzhledem k množství budovaných zemničů distribuční sítě v současné době nelze předpokládat, že by pro každý zemnič byl proveden detailní návrh a posouzení parametrů zemniče s ohledem na podmínky na místě instalace. Za tímto účelem tak byla provedena analýza problematiky modelování zemničů s vyhodnocením velikosti chyb mezi výsledky z různých modelovacích metod a přijatých zjednodušení. Zjištěné chyby byly následně využity jako vstupní údaje do provedené citlivostní analýzy a z výsledků lze předpokládat, že užitím různě pokročilých modelovacích metod se lze dopustit chyby určení individuálního rizika přibližně o polovinu řádu a případně i více (tj. 40, ale i např. 80 %). S touto mírou nejistoty při návrhu zemniče na požadovanou hodnotu rizika je vhodné počítat.

Uvedená zjištění v bodech 1.-5. jsou podložena prezentovanými výsledky v jednotlivých kapitolách a které byly současně publikovány na konferencích a v časopisech. Z hlediska problematiky modelování zemničů se autor této práce spolupodílel na revizi podnikové normy PNE 33 0000-4(4) [64] věnující se výpočtům parametrů zemničů. Výsledky z problematiky pravděpodobnostního hodnocení zemničů pak byly podkladem pro tvorbu mezinárodní příručky [102], na jejíž tvorbě se autor této práce také spolupodílel a jejíž výsledky lze v budoucnu předpokládat jako využitelné při revizi a postupné implementaci pravděpodobnostního postupu do mezinárodních standardů, zejména EN 50522, plánované revize 4.

### 7.1 Náměty pro navazující postup

V rámci této práce byly řešeny dvě hlavní oblasti a to modelování zemničů a pravděpodobnostní přístup hodnocení zemnících soustav. Náměty pro další výzkum z oblasti modelování zemničů byly shrnuty v kapitole 5.4.3. V případě pravděpodobnostního přístupu pak lze za nedostatečně zkoumané oblasti považovat

- Posouzení míry společenského rizika v případě zemničů distribučních trafostanic se společným uzemněním, tj. pravděpodobnosti úmrtí více osob podle 6.1. V této práci toto nebylo řešeno. Bylo řešeno pouze individuální riziko.
- Provedení implementace plné metody Monte Carlo s vyhodnocením konvolucí mezi rozloženími úrovní nebezpečí a odolností podle (6-1), tedy vyhodnocením Stress&Strength metodou. Provedení následného srovnání s v této práci prezentovaným zjednodušeným postupem. Získání přesnějších výsledků a určení tak limitací přijatého zjednodušeného řešení. V případě implementace plné metody Monte Carlo by pak bylo možné testovat vliv změn rozložení chování různých parametrů na výsledné riziko.
- Nalezení vhodných funkčních předpisů pro proložení křivek c3, c4 (či křivek jim odpovídajících včetně středních hodnot a rozptylů) a odporu lidského těla pro 50 % populace. Nalezené funkční předpisy by následně mohly posloužit jako vstupní údaj do zjednodušeného pravděpodobnostního výpočtu podle v závěru diskutovaného bodu 2.
- Využití pravděpodobnostního přístupu k optimalizaci zemniče tak, aby bylo nalezeno rozložení elektrod zemniče takové, aby průměrné/maximální aj. riziko návrhu bylo minimální. Pro tento záměr bude nezbytné navrhnout metodu jak krokovat k optimu rozložení elektrod a dále vydefinovat co je považováno za optimální návrh (maximální riziko, riziko jen v určitých bodech, průměrné riziko aj.).
- Tvorba dlouhodobé statistiky a záznamů o proběhlých poruchách. Dostupnost těchto dat by umožnila zpřesnit pravděpodobnostní návrh zemniče, kdy v současnosti jsou tyto parametry jen obtížně dostupné, případně nedostupné.
- Stanovení vlivu rozdílných hodnot dotykových napětí na vypočtené riziko v důsledku modelování zemničů pouze v DC oblasti namísto AC (např. modelování podle 5.2), a dále v důsledku rozdílů mezi zatíženými a nezatíženými dotykovými napětími.
- Stanovení vlivu pouze částečného překryvu jevů dotyku a poruchy. V reprodukovaném pravděpodobnostním přístupu bylo v této práci uvažováno vždy s délkou průtoku proudu po celou dobou trvání poruchy. V praktických příkladech mohou ovšem nastat i případy, kdy např. porucha již 500 ms trvá, a pak teprve dojde k dotyku, který následně trvá zbylých 500 ms celkového nastaveného času ochrany 1 s. Tedy pravděpodobnost fibrilace se zde sníží v důsledku nezávislosti časového výskytu jevů dotyku a poruchy.

# 8 Příloha A

Jelikož v daných podkapitolách kapitoly 5 nebyla provedena detailnější studie závislosti velikosti dotykového napětí pro různé hodnoty koeficientu odrazu K (5-45) a hloubky povrchové vrstvy H, jsou v následujících tabulkách provedeny rozbory velikosti tohoto poměru. Závislosti jsou provedeny pro tři typy zemniče (mřížový, jeden kruh a dva kruhy) jako

- 1. Mřížový zemnič měl rozměry 100x60 m s oky 10x10 m a byl umístěn v hloubce 0.5 m, schéma zemniče viz. např. Obr. 5-69.
- Kruhový zemnič měl průměr 5.5 m a byl umístěn v hloubce 0.4 m. Zemnič měl ve svém středu umístěny dva navzájem kolmé pásky, viz např. Obr. 5-36 kde byl doplněn druhý pásek.
- 3. Dvojitý kruhový zemnič se skládal ze dvou kruhů s průměry 6 a 14 m a dvou navzájem kolmých pásků spojujících oba kruhy a procházejících středem zemniče. Celý zemnič byl umístěn v jednotné hloubce 0.5 m.

Model půdy	K (-)	$R_{ ext{Dawalibi}}\left(\Omega ight)$	<i>EPR</i> <sub>Dawalibi</sub> (V)	Max TV 1m (V) <sub>Dawalibi</sub>
1500/1500/ homogenní	0	9.091	9091	2732 (30 % EPR)
1500/1200/1	-0.11	7.540	7540	2463 (33 % EPR)
1500/1200/2	-0.11	7.629	7629	2494 (33 % EPR)
1500/1200/5	-0.11	7.801	7801	2538 (33 % EPR)
1500/1200/10	-0.11	8.005	8005	2592 (32 % EPR)
1500/750/1	-0.33	5.162	5162	2005 (39 % EPR)
1500/750/2	-0.33	5.368	5368	2084 (39 % EPR)
1500/750/5	-0.33	5.759	5759	2198 (38 % EPR)
1500/750/10	-0.33	6.246	6246	2341 (37 % EPR)
1500/300/1	-0.67	2.702	2702	1438 (53 % EPR)
1500/300/2	-0.67	3.010	3005	1576 (53 % EPR)
1500/300/5	-0.67	3.565	3565	1774 (50 % EPR)
1500/300/10	-0.67	4.292	4292	2021 (47 % EPR)
1500/100/1	-0.88	1.570	1570	1119 (71 % EPR)
1500/100/2	-0.88	1.911	1911	1296 (68 % EPR)
1500/100/5	-0.88	2.527	2527	1542 (61 % EPR)
1500/100/10	-0.88	3.344	3344	1846 (55 % EPR)

Tab. A 1 Mřížový zemnič HoL

Model půdy	K(-)	$R_{ m Dawalibi}\left(\Omega ight)$	<i>EPR</i> <sub>Dawalibi</sub> (V)	Max TV 1m (V) <sub>Dawalibi</sub>
1500/1500/ homogenní	0	9.091	9091	2732 (30 % EPR)
1200/1500/1	0.11	8.797	8797	2431 (28 % EPR)
1500/1500/2	0.11	8.698	8698	2401 (28 % EPR)
1200/1500/5	0.11	8.508	8508	2358 (28 % EPR)
1200/1500/10	0.11	8.293	8293	2307 (28 % EPR)
750/1500/1	0.33	8.262	8262	1914 (23 % EPR)
750/1500/2	0.33	7.980	7980	1838 (23 % EPR)
750/1500/5	0.33	7.444	7444	1733 (23 % EPR)
750/1500/10	0.33	6.879	6879	1619 (24 % EPR)
300/1500/1	0.67	7.314	7314	1203 (16 % EPR)
300/1500/2	0.67	6.705	6705	1084 (16 % EPR)
300/1500/5	0.67	5.648	5648	930 (16 % EPR)
300/1500/10	0.67	4.706	4706	793 (17 % EPR)
100/1500/1	0.88	5.961	5961	649 (11 % EPR)
100/1500/2	0.88	5.019	5019	532 (11 % EPR)
100/1500/5	0.88	3.671	3671	401 (11 % EPR)
100/1500/10	0.88	2.717	2717	311 (11 % EPR)

Tab. A 2 Mřížový zemnič LoH
Model půdy	K(-)	$R_{ m Dawalibi}\left(\Omega ight)$	<i>EPR</i> <sub>Dawalibi</sub> (V)	Max TV 1m (V) <sub>Dawalibi</sub>
1500/1500/ homogenní	0	126.0	3781	716 (19 % EPR)
1500/1200/1	-0.11	112.1	3364	739 (22 % EPR)
1500/1200/2	-0.11	116.4	3493	728 (21 % EPR)
1500/1200/5	-0.11	121.3	3639	718 (20 % EPR)
1500/1200/10	-0.11	123.6	3707	716 (19 % EPR)
1500/750/1	-0.33	89.3	2680	780 (29 % EPR)
1500/750/2	-0.33	100.2	3007	751 (25 % EPR)
1500/750/5	-0.33	113.2	3396	721 (21 % EPR)
1500/750/10	-0.33	119.3	3579	717 (20 % EPR)
1500/300/1	-0.67	63.6	1908	835 (44 % EPR)
1500/300/2	-0.67	81.2	2436	783 (32 % EPR)
1500/300/5	-0.67	103.3	3100	726 (23 % EPR)
1500/300/10	-0.67	114.1	3422	718 (21 % EPR)
1500/100/1	-0.88	50.9	1527	866 (57 % EPR)
1500/100/2	-0.88	71.6	2147	801 (37 % EPR)
1500/100/5	-0.88	98.2	2946	729 (25 % EPR)
1500/100/10	-0.88	111.3	3340	718 (22 % EPR)

Tab. A 3 Kruhový zemnič HoL

Model půdy	K(-)	$R_{ m Dawalibi}\left(\Omega ight)$	<i>EPR</i> <sub>Dawalibi</sub> (V)	Max TV 1m (V) <sub>Dawalibi</sub>
1500/1500/ homogenní	0	126.0	3781	716 (19 % EPR)
1200/1500/1	0.11	113.8	3413	553 (16 % EPR)
1500/1500/2	0.11	109.6	3288	563 (17 % EPR)
1200/1500/5	0.11	105.1	3153	571 (18 % EPR)
1200/1500/10	0.11	103.0	3091	573 (19 % EPR)
750/1500/1	0.33	92.2	2765	318 (12 % EPR)
750/1500/2	0.33	82.3	2470	338 (14 % EPR)
750/1500/5	0.33	72.2	2166	355 (16 % EPR)
750/1500/10	0.33	67.8	2034	358 (18 % EPR)
300/1500/1	0.67	60.1	1802	106 (6 % EPR)
300/1500/2	0.67	47.1	1414	125 (9 % EPR)
300/1500/5	0.67	35.2	1058	141 (13 % EPR)
300/1500/10	0.67	30.4	911	143 (16 % EPR)
100/1500/1	0.88	32.8	984	29 (3 % EPR)
100/1500/2	0.88	22.8	685	39 (6 % EPR)
100/1500/5	0.88	14.8	443	46 (10 % EPR)
100/1500/10	0.88	11.6	349	47 (14 % EPR)

Tab. A 4 Kruhový zemnič LoH

Model půdy	K (-)	$R_{\text{Dawalibi}}(\Omega)$	<i>EPR</i> <sub>Dawalibi</sub> (V)	Max TV 1m (V) <sub>Dawalibi</sub>
1500/1500/ homogenní	0	59.5	1784	206 (12 % EPR)
1500/1200/1	-0.11	51.6	1549	218 (14 % EPR)
1500/1200/2	-0.11	53.1	1594	216 (14 % EPR)
1500/1200/5	-0.11	55.5	1665	209 (13 % EPR)
1500/1200/10	-0.11	57.1	1715	207 (12 % EPR)
1500/750/1	-0.33	39.1	1174	243 (21 % EPR)
1500/750/2	-0.33	42.8	1283	234 (18 % EPR)
1500/750/5	-0.33	48.8	1465	216 (15 % EPR)
1500/750/10	-0.33	53.2	1595	208 (13 % EPR)
1500/300/1	-0.67	25.6	767	282 (37 % EPR)
1500/300/2	-0.67	31.2	935	260 (28 % EPR)
1500/300/5	-0.67	40.9	1228	225 (18 % EPR)
1500/300/10	-0.67	48.4	1451	210 (15 % EPR)
1500/100/1	-0.88	19.1	572	307 (54 % EPR)
1500/100/2	-0.88	25.5	764	276 (36 % EPR)
1500/100/5	-0.88	36.9	1108	230 (21 % EPR)
1500/100/10	-0.88	45.9	1376	212 (15 % EPR)

Tab. A 5 Dvojitý kruhový zemnič HoL

Model půdy	K (-)	$R_{\text{Dawalibi}}\left(\Omega ight)$	<i>EPR</i> <sub>Dawalibi</sub> (V)	Max TV 1m (V) <sub>Dawalibi</sub>
1500/1500/ homogenní	0	59.5	1784	206 (12 % EPR)
1200/1500/1	0.11	55.0	1651	155 (9 % EPR)
1500/1500/2	0.11	53.5	1605	157 (10 % EPR)
1200/1500/5	0.11	51.2	1536	162 (11 % EPR)
1200/1500/10	0.11	49.7	1490	164 (11 % EPR)
750/1500/1	0.33	47.1	1413	83 (6 % EPR)
750/1500/2	0.33	43.2	1295	87 (7 % EPR)
750/1500/5	0.33	37.7	1130	97 (9 % EPR)
750/1500/10	0.33	34.3	1028	102 (10 % EPR)
300/1500/1	0.67	34.4	1031	23 (2 % EPR)
300/1500/2	0.67	28.2	846	27 (3 % EPR)
300/1500/5	0.67	20.8	625	36 (6 % EPR)
300/1500/10	0.67	16.9	506	40 (8 % EPR)
100/1500/1	0.88	21.4	642	5 (1 % EPR)
100/1500/2	0.88	15.6	467	7 (2 % EPR)
100/1500/5	0.88	9.8	295	11 (4 % EPR)
100/1500/10	0.88	7.1	214	13 (6 % EPR)

Tab. A 6 Dvojitý kruhový zemnič LoH

# 9 Příloha B



Obr. B 1 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c1-c2 bez přídavných izolací



Obr. B 2 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c1-c3 bez přídavných izolací



Obr. B 3 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c1-c4 bez přídavných izolací



Obr. B 4 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c2-c3 bez přídavných izolací



Obr. B 5 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c2-c4 bez přídavných izolací



Obr. B 6 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c3-c4 s Rshoe 2000 Ω a ρ 5 Ωm



Obr. B 7 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c3-c4 s Rshoe 5000 Ω a ρ 5 Ωm



Obr. B 8 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c3-c4 s Rshoe 2000 Ω a ρ 5000 Ωm



Obr. B 9 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHBF a křivky c3-c4 s Rshoe 5000 Ω a ρ 5000 Ωm



Obr. B 10 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu RHRF a křivky c3-c4 bez přídavných izolací



Obr. B 11 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHLF a křivky c3-c4 bez přídavných izolací



Obr. B 12 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu BHBF a křivky c3-c4 bez přídavných izolací



Obr. B 13 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu RHRF a křivky c3-c4 s Rshoe 1000 Ω a ρ 5 Ωm



Obr. B 14 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHLF a křivky c3-c4 s Rshoe 1000 Ω a ρ 5 Ωm



Obr. B 15 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu BHBF a křivky c3-c4 s Rshoe 1000 Ω a ρ 5 Ωm



Obr. B 16 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu RHRF a křivky c3-c4 s Rshoe 1000 Ω a ρ 5000 Ωm



Obr. B 17 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu LHLF a křivky c3-c4 s Rshoe 1000 Ω a ρ 5000 Ωm



*Obr. B 18 Porovnání výsledků pravděpodobnosti fibrilace vypočtené podle Argonium a Erisk na soustavě křivek násobků Vvtp dovoleného dotykového napětí v závislosti na čase působení, Erisk vypočteno pro dráhu BHBF a křivky c3-c4 s Rshoe 1000 Ω a ρ 5000 Ωm* 

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] EN 61936-1:2010: Power installations exceeding 1 kV a.c. Part 1: Common rules. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission; ed.2.0, 2010.
- [2] EN 50522:2010: Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c. European Committee for Electrotechnical Standardization; 2010.
- [3] PNE 33 0000-1(6):2017: Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě. Praha, ÚJV Řež, 2011.
- [4] IEC TS 60479-1:2005: Effects of current on human beings and livestock Part 1: General aspects. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission; ed.4.0, 2005.
- [5] Biegelmeier, G., Lee, W.R. New Considerations on the Threshold of Ventricular Fibrillation for a.c. Shocks at 50-60 Hz. IEE Proc. 1980, vol. 127, no. 2, p. 103-110.
- [6] IEEE Std 80-2000: IEEE Guide for safety in AC substation grounding. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers; Jan 2000.
- [7] Dalziel, C.F., Lee. W.R. Reevaluation of Lethal Electric Currents. IEEE Transaction on Industry and General Applications. 1968, vol. IGA-4, no.5, p. 467-476.
- [8] Ferris, L.P., King. B.G., Spence, P.W., Williams. H.B. Effect of Electric Shock on the Heart. The Bell System Technical Journal. 1936, vol. 55, p. 498-515.
- [9] Kouwenhoven. W.B., et al. A-C Shocks of Varying Parameters Affecting the Hearth. Transaction of the AIEE Part 1: Communication Electronics. 1959, vol. 78, p. 163-169.
- [10] Lee. C-H., Meliopoulos. AP. A Comparison of IEC 479-1 and IEEE Std 80 on Grounding Safety Criteria. Proc. Natl. Sci. Counc. Repub. China. 1999, vol. 23, no. 5, p. 612-621.
- [11] Dimopoulos. A., et. al. Probability surface distributions for application in grounding safety assessment. IEEE Transaction on Power Delivery. 2012, vol. 27, no. 4, p. 1928-1936.
- [12] Karkkainen. S., Palva. V., Application of Probability Calculations to the Study of Earthing Voltage Requirements for Electrical Safety Codes. Electricity in Finland. 1979, vol. 47, no. 11, p. 463-471.
- [13] El-Kady. M.A., Ford. G.L. An Advanced Probabilistic Short-Circuit Program. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1983, vol. PAS-102, no. 5, p. 1240-1248.
- [14] El-Kady. M.A. Probabilistic Short-Circuit Analysis by Monte Carlo Simulations. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1983, vol. PAS-102, no. 5, p. 1308-1316.
- [15] El-Kady. M.A., Hotte. P.W., Vainberg. M.Y. Probabilistic Assessment of Step and Touch Potentials Near Transmission Line Structures. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1983, vol. PAS-102, no. 3, p. 640-645.
- [16] El-Kady. M.A., Vainberg. M.Y. Risk Assessment of Grounding Hazards due to Step and Touch Potentials Near Transmission Line Structures. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1983, vol. PAS-102, no. 9, p. 3080-3087.
- [17] Endrenyi. J. Analysis of Transmission Tower Potentials During Ground Faults. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1967, vol. PAS-86, no. 10, p. 1274-1283.
- [18] Cherney. E.A., Ringler. K.G., Kolcio. N., Bell. G.K. Step and Touch Potentials at Faulted Transmission Towers. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1981, vol. PAS-100, no. 7, p. 3312-3321.

- [19] Dawalibi. F. Ground Fault Current Distribution Between Soil and Neutral Conductors. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1980, vol. PAS-99, no.2, p. 452-461.
- [20] Wang. W., Velazquez. R., Mukhedkar. D., Gervais. Y. A Practical Probabilistic Method to Evaluate Tolerable Step and Touch Voltages. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1984, vol. PAS-103, no. 12, p. 3521-3530.
- [21] Wang. W., Mukhedkar. D., Gervais. Y. Sensitivity Analysis of the Total Accident Probability of a Grounding System. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1985, vol. PAS-104, no. 7, p. 1761-1765.
- [22] Wang. W., Gervais. Y., Mukhedkar. D. Probabilistic Evaluation of Human Safety Near HVDC Ground Electrode. IEEE Transaction on Power delivery. 1986, vol. 1, no. 1, p. 105-110.
- [23] Sverak. J.G., et. al. A Probabilistic Method for the Design of Power Grounding Systems. IEEE Transaction on Power delivery. 1992, vol. 7, no. 3, p. 1196-1206.
- [24] Nahman. J.M. Assessment of the Risk of Fatal Electric Shocks Inside a Substation and in Nearby Exposed Areas. IEEE Transaction on Power Delivery. 1990, vol. 5, no. 4, p. 1794-1801.
- [25] Nahman. J.M., Zlatanoski. M. Risk of Fatal Electric Shocks at Distribution Network MV/LV Transformer Stations. IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution. 1998, vol. 145, no. 4, p. 463-467.
- [26] Carman. W.D., Mukhedkar. D. Practical Touch Potential Criteria for Australian Electrical Power Distribution. IEEE Transaction on Power Delivery. 1990, vol. 5, no. 4, p. 2063-2071.
- [27] Carman. W.D., Woodhouse. D.J. Performance Evaluation of Series Impedance Insulation as Earthing System Safety Mitigation Measures. In Proceedings of International Conference on Power System Technology PowerCon 2000. Australia, 2000, p. 1353-1358.
- [28] Carman. W.D. Development of Risk Profiles Associated with Electrical Power Substation Earthing Systems. In Proceedings of International Conference on Power System Technology PowerCon 2000. Australia, 2000, p. 1341-1346.
- [29] Carman. W.D., Woodhouse. D.J. Probabilistic Assessment of Risk Associated with Mobile Telephone Antennas on HV Towers. In Proceedings of International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance IEEE ESMO - 2000. Montreal(Canada), 2000, p. 154-158.
- [30] Carman. W.D. Probabilistic Comparison and Application of International Electrical Safety Criteria. In Proceedings of International Conference on Power System Technology PowerCon 2000. Australia, 2000, p. 1347-1352.
- [31] Papoulis. A. Probability, Random Variables and Stochastic Processes. McGraw-Hill, 1991. 666 pages. ISBN 0-07-048477-5.
- [32] Dimopoulos. A., el. al. Probability Surface Distribution for Application in Grounding Safety Assessment. IEEE Transaction on Power Delivery. 2012, vol. 27, no. 4, p. 1928-1936.
- [33] Dimopolous. A., el. al. Proposal for Probabilistic Risk Assessment in Grounding Systems and Its Application to Transmission Substations. IEEE Transaction on Power Delivery. 2012, vol. 27, no. 4, p. 2219-2226.
- [34] Dawalibi. F.P., Donoso. F. Integrated Analysis Software for Grounding, EMF, and EMI. IEEE Computer Applications in Power. 1993, vol. 6, no. 2, p. 19-24.

- [35] BS EN 50522:2010: Earthing of Power Installations exceeding 1 kV a.c. National Annex NB. (British-adopted European Standard). British Standards Instituion; 2012.
- [36] UK Health and Safety Executives (HSE). The Tolerability of Risks From Nuclear Power Stations. London, U.K., HMSO, 1992.
- [37] EG-0 Power System Earthing Guide Part 1: Management principles. Canberra: Energy Network Association; May 2010.
- [38] Argon safety assessment software v. 3-6-5, Energy Networks Association (Aust.). https://www.energynetworks.com.au/resources/guidelines/industry-guidelines/
- [39] Argonium safety assessment software, Cigre B3 Committee & Energy Networks Association (Aust.), argonium.com.au [cit. 03-02-2020].
- [40] Kosztaluk. R., Mukhedkar. Dinkar., Gervais. Y. Field Measurements of Touch and Step Voltages. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1984, vol. PAS-103, no. 11, p. 3286-3294.
- [41] Bastian. M.B., Carman. W.D., Woodhouse. D.J. Real-Time Monitoring of Substation Ground Potential Rise and Grounding System Impedance Using Power System Faults. IEEE Transaction on Industry Applications. 2015, vol. 51, no. 6, p. 5298-5304.
- [42] Woodhouse. D.J., Middleton. R.H. Assessment of Analysis Techniques used in determining Grounding System Potential Rise from the Fall of Potential Method. In Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting. USA, 2000, p. 1153-1158.
- [43] Baštinec. J., Statistika, Stochastické Procesy, Operační Výzkum (Statistic, Stochastic Processes, Operational Research). Brno: Ústav Matematiky VUT v Brně, 2014. 244 pages.
- [44] Montgomery. D.C., Runger. G.C. Applied Statistic and Probability for engineers. John Wiley & Sons USA, 2002. 976 pages. ISBN 0-471-20454-4.
- [45] Peters. O.S. Ground Connections for Electrical Systems. National Bureau of Standards. 1918, Technological papers 108.
- [46] Maxwell. J.C. On Physical Lines of Force. Philosophical Magazine. 1861, vol. 90, p. 11-23.
- [47] Maxwell. J.C. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1865, vol. 155, p. 459-512.
- [48] Dědková. J., Kříž. T. Modelování elektromagnetických polí (Modelling of Electromagnetic Fields). Brno: Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky, 2012, 100 pages. ISBN 978-80-214-4401-0.
- [49] Dwight. H.B. Calculation of Resistances to Ground and of Capacitances. Journal of Mathematics and Physic. 1931, vol. 10, no. 1, p. 50.
- [50] Dwight. H.B. Calculation of Resistances to Ground. Transaction on the American Institute of Electrical Engineers. 1936, vol, 55, no. 12, p. 1319-1328.
- [51] Ollendorf. F. Erdströme. Julius Springer Berlin. 1928. 260 pages.
- [52] Rüdenberg. R. Grounding Principles and Practice I Fundamental Considerations on Grounding Currents. Electrical Engineering. 1945, vol. 64, no. 1, p. 1-13.
- [53] Schwarz. S.J. Analytical Expression for Resistance of Grounding Systems. Transaction of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems. 1954, vol. 73, no. 2, p. 1011-1016.
- [54] He. J., Zeng. R., Zhang. B. Methodology and Technology for Power System Grounding. Singapore: Wiley, 2013. 557 pages. ISBN 978-1-118-25495-0

- [55] Nahman. J., Salamon. D. Analytical Expressions for the Resistance of Grounding Grids in Nonuniform Soil. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1984, vol. PAS-103, no. 4, p. 880-885.
- [56] Sunde. E.D. Earth Conduction Effects in Transmission Systems. New York: Dover Publications, 1968. 370 pages.
- [57] Dawalibi. F., Mukhedkar. D. Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure Part I - Analytical Study. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1975, vol. PAS-94, no. 2, p. 252-261.
- [58] Grcev. L., Dawalibi. F. An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems. IEEE Transactions on Power Delivery. 1990, vol. 5, no. 4, p. 1773-1781.
- [59] Meliopoulos. A.P., Mohram. M.G. Transient Analysis of Grounding Systems. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1983, vol. PAS-102, no. 2, p. 389-399.
- [60] Zhang. B., et al. Numerical Analysis of Transient Performance of Grounding Systems Considering Soil Ionization by Coupling Moment Method with Circuit Theory. IEEE Transaction on Magnetics. 2005, vol. 41, no. 5, p. 1440-1443.
- [61] Griffiths. H., Haddad. A., Harid. N. Characterisation of Earthing Systems under High Frequency and Transient Conditions. In Proceedings of 39th International Universities Power Engineering Conference. UK, 2004. p. 188-192.
- [62] Hasan. H., et al. Characterization of Horizontal Earth Electrodes: Variable Frequency and Impulse Responses. In Proceedings of 50th International Universities Power Engineering Conference UPEC. UK, 2015. p. 1-5.
- [63] Hamzehbahmani. H., Haddad. A., Griffiths. H., Harid. N., Guo. D. Application of an Analysis Technique to Characterise Impulse Response of Grounding Systems. In Proceedings of the 33rd International Conference on Lightning Protection ICLP. Portugal, 2016, p. 1-6.
- [64] PNE 33 0000-4(4):2019: Příklady výpočtu uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny. České Budějovice, Procháza. K. EGC-EnerGoConsult, Vyčítal. V. VUT v Brně, 2019.
- [65] Osolsobě. J. Zemnění a bezpečnost. Praha Nakladatelství Československé akademie věd, 1964. 792 pages.
- [66] Blattner. C.J. Prediction of Soil Resistivity and Ground Rod Resistance for Deep Ground Electrodes. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1980, vol. PAS-99, no. 5, p. 1758-1763.
- [67] Anggoro. B., Yutadhia. R.E. The Grounding Impedance Characteristics of Grid Configuration. In Proceedings of 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics ICEEI. 2013, p. 1156-1162.
- [68] Howe. G.W.O. Capacity of Radio-Telegraph Antennae. The Electrician. 1914, vol. 73.
- [69] Byerly. W.E. Fouriers Series and Spherical, Cylindrical, and Ellipsoidal Harmonics. Boston, Mass, Ginn and Company, 1893. p. 153.
- [70] Vyčítal V., Topolánek D., Toman P. Analýza přesnosti koeficientů využití zemničů s využitím simulace pomocí metody konečných prvků. Brno, Ústav elektroenergetiky VUT v Brně, 2017, 114 pages.
- [71] Kočvara. A. Uzemněňování elektrických zařízení. Praha STROM, 1995, 94 pages.

- [72] PNE 33 0000-4(3):2011: Příklady výpočtu uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny. Praha, ÚJV Řež, 2011.
- [73] Ansoft Maxwell package, program pro výpočet elektromagnetických polí, verze 16.
- [74] Vyčítal. V., Ptáček. M., Toman. P., Topolánek. D. Earthing System Resistance Calculation Using Analytical Approach with Mutual Coefficients. In Proceedings of 18th International Scientific Conference on Electrical Power Engineering EPE. Czech Republic, 2017, p. 67-72.
- [75] Vyčítal. V., Topolánek. D., Toman. P., Ptáček. M. Výpočet zemních odporů s koeficienty využití podle PNE 33-0000-4 a jejich správnost. In Proceedings of ČK CIRED 2017 conference. Tábor, Czech Republic, 2017, p. 1-19.
- [76] Tagg. G.F. Earth Resistances. London: George Newnes Limited, 1964. 258 pages.
- [77] Blumentritt. R.A. A Theoretical Earth Resistivity Study with Applications on the Llano Estacado. Master of Science thesis. Texas Technological College, 1969. 108 pages.
- [78] Wenner. F. A Method of Measuring Earth Resistivity. Bulletin of the Bureau of Standards. 1915, p. 469-478.
- [79] Orságová. J. Elektrické stanice a vedení studijní script. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2013, 145 pages.
- [80] Gish. O. H., Rooney. W. J. Measurement of Resistivity of Large Masses of Undisturbed Earth. Terrestrial magnetism and Atmospheric Electricity, 1925.
- [81] Lancaster-Jones E. The Earth Resistivity Method of Electrical Prospecting. The Mining Magazine. June 1930.
- [82] Matyska. S. Měření elektrické resistivity půdy. Master Thesis supervised by Václav Vyčítal. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2018, 100 pages.
- [83] IEEE Std 81-2012: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2012.
- [84] MATLAB 2017b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [85] PNE 33 3300-1:2017: Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn. EGU-HV Laboratory, 2017.
- [86] Kuběna. M. Vhodnost modelování skutečného modelu půdy náhradním jednovrstvým nebo dvouvrstvým horizontálním modelem půdy. Master Thesis supervised by Václav Vyčítal. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2019, 90 pages.
- [87] Vycital. V., Topolanek. D., Toman. P., Ptacek. M. Sensitivity Analysis of Earthing System Impedance For Single and Multilayered Soil. In Proceedings of the 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED – Open Access Proceedings Journal. Glasgow, UK, 2017, p. 1-5.
- [88] Jacqmaer. P., Driesen. J.L. Modelling of Grounding Systems with the Method of Moments. In Proceedings of the 3rd IEEE Benelux Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering. Ghent, Belgium, 2006, p. 1-10.
- [89] COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- [90] Fortin. S., Yang. Y., Ma. J., Dawalibi. F. Electromagnetic Fields of Energized Conductors in Multilayer Medium with Recursive Methodology. In Proceedings of Asia-Pacific Power and Engineering Conference. Wuhan, China, 2009, 1-4.

- [91] Vycital. V., Toman. P. Modelling of Electrical Installations Earthing Systems in Ansoft Maxwell. In Proceedings of the 24th Conference STUDENT EEICT 2018. Brno, Czech Republic, 2018, p. 487-491.
- [92] Vycital. V., Ptacek. M., Topolanek. D., Toman. P. On Minimisation of Earthing System Touch Voltages. Energies. 2019, vol. 12, no. 20, p. 1-15. ISSN 1996-1073.
- [93] Vycital. V., Ptacek. M., Topolanek. D., Toman. P. Optimisation of Earthing System Design through Touch Voltage Minimisation using Ansys Maxwell. In Proceedings of the 10 International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2019. Stará Lesná, Slovak Republic, 2019, p. 562-566.
- [94] Dawalibi. F. Transmission Line Grounding. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute EPRI, Final Report Project 1494-1, 1982, 433 pages.
- [95] Dawalibi. F., Mukhedkar. D. Multi Step Analysis of Interconnected Grounding Electrodes. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1976, vol. PAS-95, no. 1, p. 113-119.
- [96] Grcev. L., Dawalibi. F. An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems. IEEE Transactions on Power Delivery. 1990, vol. 5, no. 4, p. 1773-1781.
- [97] Grcev. L. Calculation of the Transient Impedance of Grounding Systems. D. Sc., thesis (in Serbo-Croatian), University of Zagreb, Yugoslavia 1986.
- [98] Papalexopoulos. A.D., Meliopoulos. A.P. Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems. IEEE Transactions on Power Delivery. 1987, vol. PWRD-2, no. 4, p. 1073-1081.
- [99] Dawalibi. D., Barbeito. N. Measurements and Computations of the Performance of Grounding Systems Buried in Multilayer Soils. IEEE Transactions on Power Delivery. 1991, vol. 6, no. 4, p. 1483-1490.
- [100] Dawalibi. F., Mukhedkar. D., Bensted. Measured and Computed Current Densities in Buried Ground Conductors. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1981, vol. PAS-100, no. 8, p. 4083-4092.
- [101] Dawalibi. F., Mukhedkar. D. Parametric Analysis of Grounding Grids. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1979, vol. PAS-98, no. 5, p. 1659-1668.
- [102] Carman. B., Palmer. S., Fickert. L., Connor. T., Griffiths. H., Vycital. V. et al. Substation Earthing System Design Optimisation through the Application of Quantified Risk Analysis. Paris, France: Cigre-International Council on Large Electric Systems, 2018, 198 pages. ISBN 978-2-85873-451-1.
- [103] Garrett. D.L., Pruitt. J.G. Problems Encountered with the Average Potential Method of Analyzing Substation Grounding Systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1985, vol. PAS-104, no. 12, p. 3586-3596.
- [104] Laver. J.A., Griffiths. H. The Variability of Soils in Earthing Measurements and Earthing System Performance. In Proceedings of Rev. Energ. Ren.: Power Engineering Conference. 2001, p. 57-61.
- [105] Topolanek. D., Vycital. V., Toman. P., Carman. B. Application of the Probabilistic Approach for Earthing System Evaluation in Distribution Network. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018, vol. 20, no. 110, p. 268-279. ISSN: 0142-0615.
- [106] WebPlotDigitizer v. 4.2, Ankit Rohatgi, https://apps.automeris.io/wpd/, [cit. 03-02-2020].
- [107] Kumamoto. H., Henley. E.J. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. 2nd ed. New York: IEEE Press, 1996. 597 pages. ISBN 0-7803-1004-7.

- [108] Comar. C.L. Risk: A Pragmatic De Minimis Approach. Science. 1979, vol. 203, no. 4378, p. 319.
- [109] Whipple. C.G. (ed.). De Minimis Risk. New York: Plenum Press, 1987.
- [110] Reducing Risks, Protecting People. The HSE's decision making process, Health and Safety Executive, UK 2001, ISBN 0-7176-2151-0.
- [111] Ball. D.J., Floyd P.J. Societal risks. Report available from the Risk Assessment Policy Unit, Health and Safety Executive, UK, 1998.
- [112] Saw. J.L. et al. Societal Risk: Initial briefing to Societal Risk Technical Advisory Group. Norwick, UK: Health and Safety Executive and Health and Safety Laboratory, Research report RR703, 2009, 74 pages.
- [113] Wilson. R. Commentary: Risks and Their Acceptability. Science, Technology, and Human Values. 1984, vol. 9, no. 2, p. 11-22.
- [114] Milvy, P. De minimis risk and the integration of actual and perceived risks from chemical carcinogens. In De Minimis Risk, edited by C. Whipple, ch. 7, p. 75-86. New York: Plenum Press, 1987.
- [115] Griffiths. I., Woodhouse. D.J. A Calculation Framework for Quantifying the Probability of Ventricular Fibrillation of Rare Events. IEEE Transactions on Power Delivery. 2017, vol. 32, no. 4, p. 2052-2059.
- [116] Fajmon. B., Růžičková. I. Matematika 3 učební text. Brno: Ústav matematiky VUT v Brně, 205, 255 pages.
- [117] King. E., Coggan. R. EG-0 Constant Fibrillation Probability Curve Replication. In Proceedings of the 2018 Down to Earth Conference DTEC, Melbourne, Australia, 2018, p. 1-9.
- [118] Brown. M.A. Risk Based Approach to Substation Earthing for SA Power Networks. In Proceedings of the 2018 Down to Earth Conference DTEC, Melbourne, Australia, 2018, p. 1-5.
- [119] IEC 60909-0:2001: Short-circuit Currents in Three Phase a.c. Systems: Part 0: Calculation of Currents. Geneva, Switzerland, International Electrotechnical Commission, 2001.
- [120] Topolanek. D., Vycital. V., Toman. P. Pravděpodobnostní Přístup pro Hodnocení Zemnících Soustav Distribučních Sítí (Probabilistic Approach for Assessment of Earthing Systems in Distribution Networks). In Proceedings of Czech National Conference ČK CIRED 2016 (in Czech). Tábor (Czech Republic), 2016.
- [121] ČSN 33 2000-4-41(2):2007: Elektrické instalace nízkého napětí Část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti – Ochrana přeed úrazem elektrickým proudem. Český normalizační institut, ed. 2, 2007.
- [122] PNE 33 3301-1:2019: Uzemnění vedení vn a DTS vn/nn. Praha, EGU-HV Laboratory a.s., 2019.
- [123] National Highway Traffic Safety Administration, US Department of Transportation. Lives Saved in 2009 by Restraint Use and Minimum-Drinking-Age Laws. Washington USA, 2010, p. 1-2. DOT HS 811 383.
- [124] National Highway Traffic Safety Administration, US Department of Transportation. Highlights of 2009 Motor Vehicle Crashes. Washington, USA, 2010, p. 1-4. DOT HS 811 363.

[125] ČSN 33 3070:1981: Elektrotechnické předpisy. Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí. 1. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1981.

### **PUBLIKACE AUTORA**

### K tématice disertační práce

- [A1] Topolanek. D., Vycital. V., Toman. P., Carman. B. Application of the Probabilistic Approach for Earthing System Evaluation in Distribution Network. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018, vol. 20, no. 110, p. 268-279. ISSN: 0142-0615
- [A2] Topolanek. D., Vycital. V., Toman. P. Pravděpodobnostní Přístup pro Hodnocení Zemnících Soustav Distribučních Sítí (Probabilistic Approach for Assessment of Earthing Systems in Distribution Networks). In Proceedings of Czech National Conference ČK CIRED 2016 (in Czech). Tábor (Czech Republic), 2016.
- [A3] Carman. B., Palmer. S., Fickert. L., Connor. T., Griffiths. H., Vycital. V. et al. Substation Earthing System Design Optimisation through the Application of Quantified Risk Analysis. Paris, France: Cigre-International Council on Large Electric Systems, 2018, 198 pages. ISBN 978-2-85873-451-1.
- [A4] Vycital. V., Toman. P. Modelling of Electrical Installations Earthing Systems in Ansoft Maxwell. In Proceedings of the 24th Conference STUDENT EEICT 2018. Brno, Czech Republic, 2018, p. 487-491.
- [A5] Vycital. V., Ptacek. M., Topolanek. D., Toman. P. Optimisation of Earthing System Design through Touch Voltage Minimisation using Ansys Maxwell. In Proceedings of the 10 International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2019. Stará Lesná, Slovak Republic, 2019, p. 562-566.
- [A6] Vycital. V., Ptacek. M., Topolanek. D., Toman. P. On Minimisation of Earthing System Touch Voltages. Energies. 2019, vol. 12, no. 20, p. 1-15. ISSN 1996-1073.
- [A7] Vyčítal. V., Topolánek. D., Toman. P., Ptáček. M. Výpočet zemních odporů s koeficienty využití podle PNE 33-0000-4 a jejich správnost. In Proceedings of ČK CIRED 2017 conference. Tábor, Czech Republic, 2017, p. 1-19.
- [A8] Vycital. V., Topolanek. D., Toman. P., Ptacek. M. Sensitivity Analysis of Earthing System Impedance For Single and Multilayered Soil. In Proceedings of the 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED – Open Access Proceedings Journal. Glasgow, UK, 2017, p. 1-5.
- [A9] Vyčítal. V., Ptáček. M., Toman. P., Topolánek. D. Earthing System Resistance Calculation Using Analytical Approach with Mutual Coefficients. In Proceedings of 18th International Scientific Conference on Electrical Power Engineering EPE. Czech Republic, 2017, p. 67-72.
- [A10] Vyčítal V., Topolánek D., Toman P. Analýza přesnosti koeficientů využití zemničů s využitím simulace pomocí metody konečných prvků. Brno, Ústav elektroenergetiky VUT v Brně, 2017, 114 pages.
- [A11] PNE 33 0000-4(4):2019: Příklady výpočtu uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny. České Budějovice, Procháza. K. EGC-EnerGoConsult, Vyčítal. V. VUT v Brně, 2019.

### Mimo tématiku disertační práce

- [A12] Vycital. V., Toman. P. Electricity Load Forecasting Using Autoregressive and Artificial Neural Network Model. In Proceedings of the 22th Conference STUDENT EEICT 2016. Brno, Czech Republic, 2016, p. 472-476.
- [A13] Vyčítal. V., Toman. P., Rampl. M. Load-flow and Short-circuit Calculation in Sokolnice Distribution Network over Reconstruction. In Proceedings of 17th International Scientific Conference on Electrical Power Engineering EPE. Prague, Czech Republic, 2016, p. 36-40.
- [A14] Toman. P., Drapela. J., Topolanek. D., Ptacek. M., Vycital. V., Mlynek. P., Zamphiropolos.
   J. Využití Smart Metering dat pro plánování, monitorování a řízení provozu sítí. In Proceedings of ČK CIRED 2018 conference. Tábor, Czech Republic, 2018, p. 1-18.
- [A15] Vycital. V., Drapela. J., Toman. P., Topolanek. D. Frequency Characteristics of Current Transducers in 0-100 kHz. In Proceedings of International Conference on Electricity Distribution CIDEL. Buenos Aires, Argentina, 2018, p. 1-12.
- [A16] Vycital. V., Ptacek. M., Toman. P., Topolanek. D., Drapela. J. Zamphiropolos. J. Phase Identification in Smart Metering Pilot Project Komorany. In Proceedings of International Conference and Exhibition on Electricity Distribution CIRED. Madrid, Spain, 2019, p. 1-5.
- [A17] Ptacek. M., Vycital. V., Topolanek. D., Toman. P., Jurak. V., Blazek. V., Kucera. M. Nedodržení účiníku a nevyžádaná dodávka jalové energie do DS na úrovni NN. In Proceedings of ČK CIRED 2019 conference. Tábor, Czech Republic, 2019, p. 1-17.
- [A18] Ptacek. M., Vycital. V., Toman. P., Vaculik. J. Analysis of Dense-Mesh Distribution Network Operation using Long-Term Monitored Data. Energies. 2019, vol. 12, no. 22, p. 1-25. ISSN 1996-1073.
- [A19] Ptacek. M., Vycital. V., Vaculik. J. Statistické hodnocení vybraných provozních veličin mřížové sítě NN. In Proceedings of ČK CIRED 2019 conference. Tábor, Czech Republic, 2019, p. 1-14.
- [A20] Drapela. J., Topolanek. D., Hala. T., Vrana. M., Vycital. V. Assessment of Effectiveness of Distributed Generation Support for Voltage Evulation by Means of Power Control. In Proceedings of 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering EPE. Ostrava, Czech Republic, 2019, p. 1-6.