

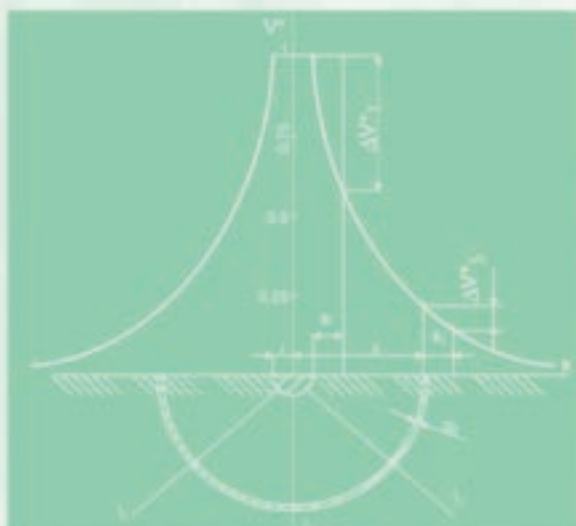
Kvalita elektrické energie - průvodce



Uzemňování & EMC

Uzemňovací systémy - Základy výpočtu a návrh

6.3.1



HUNGARIAN COPPER
PROMOTION CENTRE



Uzemňování & EMC

Uzemňování & EMC

Uzemňovací systémy - Základy výpočtu a návrh

Prof Henryk Markiewicz & Dr Antoni Klajn, Wroclaw University of Technology

Preklad: Josef Gavlas, Miloslav Kužela, Pavel Santarius, FEI Technická univerzita Ostrava, prosinec 2003

Tento průvodce byl zpracován a vydán jako část Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), Evropského vzdělávání a cvičebních programů za podpory Evropské komise (pod programem Leonardo da Vinci) a Mezinárodní Asociací Mědi. Pro další informace navštivte www stránky LPQI www.lpqi.org.

Hungarian Copper Promotion Centre (HCPC)

HCPC je nezisková organizace financovaná producenty mědi a výrobci zpracovávajícími měď. Jejím cílem je podporovat používání mědi a měděných slitin a napomáhat jejich správné a účinné aplikaci. Služby HCPC, mezi něž patří i poskytování informací a technického poradenství, jsou dostupné zájemcům o využití mědi ve všech oborech. Sdružení rovněž slouží jako prostředník mezi výzkumnými organizacemi a průmyslovými uživateli a udržuje těsné styky s obdobnými střediskami mědi ve světě.

Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB Technická univerzita Ostrava (FEI - TUO)

Fakulta elektrotechniky a informatiky zahájila svou činnost na VŠB Technické univerzitě v Ostravě od 1. ledna 1991. Fakulta zajišťuje všechny formy vysokoškolského studia (tj. bakalářské, magisterské a doktorské) ve studijním programu Elektrotechnika a informatika s ucelenou strukturou elektrotechnických oborů a inženýrské informatiky. Nedílnou součástí činnosti pedagogů na fakultě je i vědecko-výzkumná činnost, kde jedním z nosných programů je kvalita elektrické energie s hlavním zaměřením na problematiku monitorování parametrů kvality a na problematiku harmonických v elektrických sítích.

European Copper Institute (ECI)

European Copper Institute je organizací založenou podporujícími členy ICA (International Copper Association) a IWCC (International Wrought Copper Council). ECI zastupuje největší světové producenty mědi a přední evropské výrobce při propagaci mědi v Evropě. ECI, který byl založen v roce 1996, se opírá o síť deseti národních organizací mědi (Copper Development Associations - 'CDAs') v Beneluxu, Francii, Německu, Řecku, Maďarsku, Itálii, Polsku, Skandinávii, Španělsku a Spojeném království. Navazuje na činnost sdružení Copper Products Development Association založeného v roce 1959 a INCRA (International Copper Research Association) založeného v roce 1961.

Upozornění

Obsah tohoto materiálu nemusí nutně vyjadřovat názor Evropského společenství a není pro něj ani závazný. European Copper Institute a Hungarian Copper Promotion Centre odmítají odpovědnost za jakékoliv přímé, nepřímé či vedlejší škody, které mohou být způsobeny nesprávným využitím informací v této publikaci.

Copyright© European Copper Institute a Copper Development Association.

Česká verze byla připravena ve spolupráci HCPC a Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB - Technické Univerzity Ostrava.

Reprodukce je možná za předpokladu, že materiál bude otištěn v nezkrácené podobě a s uvedením zdroje.



HUNGARIAN COPPER
PROMOTION CENTRE

Hungarian Copper Promotion
Centre
Képiró u. 9
H - 1053 Budapest
Maďarsko
Tel.: 00 361 266 4810
Tel.: 00 361 266 4804
E-mail: hpcp@euroweb.hu
Website: www.hpcpinfo.org



VŠB-TU Ostrava
Fakulta elektrotechniky
a informatiky
Katedra elektroenergetiky
17. listopadu 15
CZ 708 33 Ostrava-Poruba
Tel.: +420 597324279
Tel.: +420 596919597
E-mail: pavel.santarius@vsb.cz
Website: homen.vsb.cz/san50/



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B - 1150 Brussels
Belgium
Tel.: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org

Uzemňování & EMC

Uzemňovací systémy - Základy výpočtu a návrh

Úvod

Část 6.1 tohoto průvodce přináší přehled požadavků na uzemňovací systém a rozebírá potřebu systematického přístupu při jeho návrhu. Speciální pozornost je věnována instalacím v budovách. Tato část se zabývá návrhem zemnicího elektroodvodového systému, zatímco Část 6.5.1 poskytuje praktického průvodce při návrhu zemnicích elektrod a souvisejících výpočtů.

Uzemňovací systém, někdy též zjednodušeně nazýván "uzemnění", je kompletní množina opatření použitých k propojení elektricky vodivých částí se zemí. Uzemňovací systém je základní částí přenosových sítí, vysoko - i nízkonapěťových. Dobrý uzemňovací systém je důležitý pro:

- ochranu budov a zařízení před bleskem
- omezení dotykového a krokového napětí na bezpečné hodnoty k zajištění bezpečnosti lidí a zvířat
- elektromagnetickou kompatibilitu (EMC) - tj. omezení elektromagnetických poruch
- správnou činnost distribučních sítí a pro dobrou kvalitu elektrické energie

Všechny tyto funkce jsou zajištěny za předpokladu jednoho uzemňovacího systému, který musí být navržen tak, aby vyhovoval všem požadavkům. Některé části uzemňovacího systému mohou být navrženy jen k specifickému účelu, přesto jsou však stále částí jednoho uzemňovacího systému. Standardy vyžadují, aby všechna uzemňovací opatření v rámci instalace byla provázána a vytvářela tak jeden systém.

Základní definice [1,2]

Uzemnění či uzemňovací systém je souhrn všech prostředků a opatření pomocí kterých jsou části elektrického obvodu, přístupné vodivé části elektrických zařízení (exponované vodivé části) nebo vodivé části v blízkosti elektrických instalací (vnější vodivé části) spojeny se zemí.

Uzemňovací elektroda je kovový vodič nebo systém několika vzájemně propojených vodičů nebo jiných kovových částí majících stejné vlastnosti, zapuštěných v zemi a elektricky spojených se zemí, případně zapuštěné v betonu, který je na velké ploše v kontaktu se zemí (např. základy budovy).

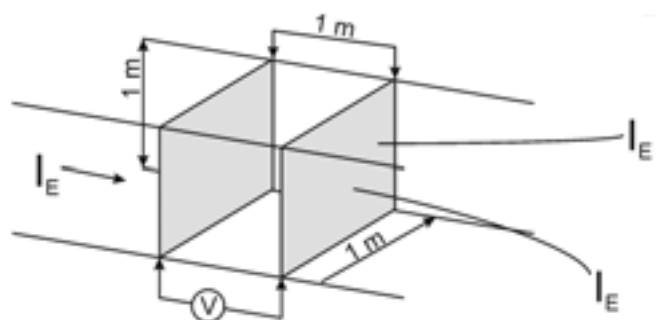
Uzemňovací vodič je vodič který spojuje část elektrické instalace, exponované vodivé části nebo vnější vodivé části s uzemňovací elektrodou nebo vodič, který propojuje uzemňovací elektrody. Uzemňovací vodič je uložen nad zemí. V případě, že by byl uložen v zemi, je od ní izolován.

Referenční zem je část povrchu, nejčastěji zemského, umístěného mimo pole působnosti uvažované uzemňovací elektrody, tedy mezi dvěma náhodnými body ve kterých není znatelné působení napětí vzniklého tokem uzemňovacího proudu uvažovanou elektrodou. Předpokládá se, že potenciál referenční země je vždy nulový.

Uzemňovací napětí (uzemňovací potenciál) V_E je napětí vznikající mezi uzemňovacím systémem a referenční zemí při dané hodnotě uzemňovacího proudu tekoucím zmíněným uzemňovacím systémem.

Měrný odpor země ρ (specifický odpor země) je odpor měřený mezi dvěma protilehlými stranami krychle o hraně jeden metr (Obr. 1). Měrný odpor země je udáván v Ωm .

Zemnicí povrchové napětí V_x je napětí mezi bodem x na zemském povrchu a referenční zemí.



Obr. 1 - Diagram znázorňující fyzikální význam měrného odporu země ρ

Elektrické vlastnosti země

Elektrické vlastnosti země jsou charakterizovány měrným odporem ρ . Nehledě na relativně snadnou definici ρ uvedenou výše je přesné určení jeho hodnoty často komplikovaným úkolem. Dva hlavní důvody jsou tyto:

- zem nemá homogenní strukturu, ale je tvořena vrstvami různých materiálů.
- měrný odpor různých částí země má velký rozptyl (Tabulka 1) a je velmi závislý na obsahu vlhkosti

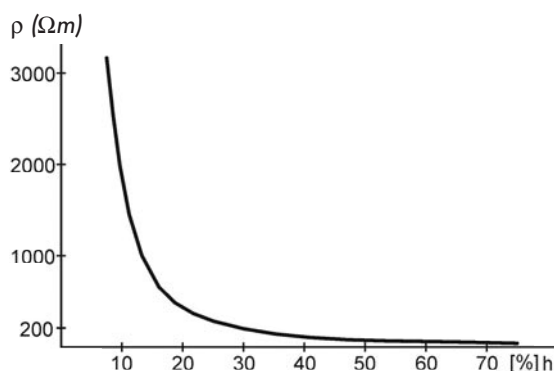
Výpočet zemního odporu vyžaduje dobré znalosti o vlastnostech půdy, zejména její odpor ρ . Zde je velkým problémem značný rozptyl hodnoty ρ . V mnoha praktických situacích považujeme zem za homogenní strukturu s průměrnou hodnotou ρ , která musí být určena na základě analýzy půdy nebo měření. Existují techniky pro měření zemního odporu. Je důležité, aby rozdělení proudu v půdních vrstvách použitých během měření simulovala případ konkrétní instalace. Důležitá je také pečlivá interpretace naměřených údajů. V případě, že nejsou známy žádné konkrétní hodnoty ρ , obvykle se předpokládá $\rho = 100 \Omega m$. Ovšem jak naznačuje Tabulka 1, skutečná hodnota může být velmi odlišná. Proto je nutné při přebírání hotové instalace provést testy a vzít v úvahu možné odchylky vzniklé vlivem počasí v průběhu existence instalace.

Druh země	měrný odpor země ρ [Ωm]	
	Rozsah hodnot	Průměrná hodnota
Bahnitý (močalovitý)	2 - 50	30
jílovitá půda	2 - 200	40
Nánosy a písko-jílovitá zem, humus	20 - 260	100
Písek a písčité zem	50 - 3,000	200 (vlhký)
Rašelina	> 1,200	200
Štěrka (vlhký)	50 - 3,000	1,000 (vlhký)
Kamenitá a skalnatá zem	100 - 8,000	2,000
Beton: 1 díl cementu + 3 díly písku	50 - 300	150
1 díl cementu + 5 dílů štěrku	100 - 8,000	400

Tabulka 1 - Měrný odpor země ρ pro různé druhy půdy a betonu [2, 3]

Dalším problémem při určování odporu půdy je obsah vlhkosti. Množství vlhkosti se může velmi lišit v závislosti na geografické lokalitě a povětrnostních podmínkách - od nízkých procentuálních hodnot v pouštních regionech až k 80% v bažinatých regionech. Na tomto parametru značně závisí zemní odpor. Obr. 2 znázorňuje vztah mezi odporem a vlhkostí u hlíny (jílu). Můžeme vidět, že pro hodnoty vlhkosti vyšší než 30%, jsou změny ρ velmi malé a nevýznamné. Avšak když je zem suchá, tedy hodnoty vlhkosti h jsou nižší než 20%, odpor roste velmi rychle.

V regionech s mírným podnebím, například v evropských zemích, se zemní odpor mění v závislosti na ročním období, kvůli závislosti půdní



Obr. 2 - Měrný odpor jílu ρ , jako funkce vlhkosti půdy h

vlhkosti na zemnicím odporu. V Evropě má tato závislost zhruba sinusový průběh. Maximální hodnoty zemnicího odporu se objevují v únoru a minimální v srpnu. Průměrné hodnoty se vyskytují v květnu a listopadu. Amplituda v únoru je zhruba o 30% větší než je průměr, zatímco v srpnu je zhruba o 30% nižší než je průměr [4].

Je nutné si zapamatovat, že mráz má podobné účinky jako vysychání - odpor se značně zvyšuje.

Z těchto důvodů je možné spočítat zemnicí odpor a naplánovat elektrody jen s jistou limitující přesností.

Elektrické vlastnosti uzemňovacího systému

Elektrické vlastnosti uzemnění závisí zejména na dvou parametrech:

- zemnicí odpor
- konfigurace zemnicí elektrody

Zemnicí odpor určuje závislost mezi uzemňovacím napětím VE a hodnotou zemnicího proudu. Konfigurace uzemňovací elektrody určuje rozložení potenciálu na zemském povrchu, což je důsledek toku proudu v zemi. Rozložení potenciálu na zemském povrchu je důležité pro úvahy o stupni ochrany před elektrickým šokem, neboť určuje dotyková a kroková napětí. Tyto problémy jsou nastíněny níže v textu.

Zemnicí odpor má dvě složky:

- rozptylový odpor R_D , což je odpor země mezi uzemňovací elektrodou a referenční zemí
- odpor R_L kovových částí uzemňovací elektrody a uzemňovacího vodiče

Odpor R_L je většinou mnohem menší než rozptylový odpor R_D . Proto se většinou předpokládá, že je uzemňovací odpor roven rozptylovému odporu R_D . V literatuře se většinou "uzemňovacím odporem" míní rozptylový odpor.

Jakékoliv spojení se zemí jež poskytuje napáječ se jeví jako paralelní s lokální zemí a je možno předpokládat, že bude mít nižší impedanci pro základní a harmonické frekvence. Na druhou stranu dostupnost a charakteristika tohoto spojení je mimo projektantův vliv a proto by se s ním nemělo počítat v návrhu uzemňovacího systému, který by měl sám o sobě vyhovovat požadovanému účelu.

Zemnicí odpor a rozložení potencionálu

Ve střídavých obvodech je nutné posuzovat zejména impedanci uzemnění Z_E , což je impedance mezi uzemňovacím systémem a referenční zemí při dané provozní frekvenci. Reaktance uzemňovacího systému je reaktancí uzemňovacího vodiče a kovových částí uzemňovací elektrody. Při nízkých frekvencích - napájecí frekvenci a přidružené harmonické - je reaktance obvykle zanedbatelná v porovnání se zemnicím odporem, ale je nutno s ní počítat při vyšších frekvencích např. u přechodových dějů způsobených bleskem. Proto pro nízké frekvence předpokládáme, že je uzemňovací impedance Z_E rovna rozptylovému odporu R_D , u kterého se zase předpokládá, že je zhruba roven zemnicímu odporu R

$$Z_E \cong R_D \cong R$$

Zemnicí odpor R uzemňovací elektrody závisí na měrném odporu země ρ a stejnou měrou i na geometrii elektrody. Abychom dosáhli nízkých hodnot R , hustota proudu tekoucího z kovu elektrody do země by měla být malá, tj. objem země kterým proud protéká by měl být co největší. Proud tekoucí z kovu do země se rozptýlí a tím sníží hustotu proudu. Pokud je elektroda fyzicky malá, např. bodová, je tento efekt velký, na rozdíl např. od desky, kde k efektivnímu rozptýlení dochází pouze na hranách. To znamená, že tyčové, trubicové nebo drátové elektrody mají mnohem nižší rozptylový odpor než např. deskové elektrody se stejnou povrchovou plochou. Navíc je z literatury dobře známý fakt, že množství koroze způsobené

Uzemňovací systémy - Základy výpočtu a návrh

stejnoseměrným a střídavým proudem se zvyšuje s hustotou proudu. Nižší hustota proudu prodlužuje život elektrody.

Výpočet zemnicího odporu se obvykle provádí za předpokladu, že zem je neohraničená a má jednotnou strukturu s danou hodnotou odporu. Je možno odvodit přesné rovnice pro zemnicí odpor, ale v praxi je jejich užitná hodnota velmi omezena, zejména v případech komplexních a síťových elektrod, kdy se stávají matematické výrazy velmi komplikované. Navíc i velmi malá nepřesnost v hodnotě odporu má významný vliv na skutečný uzemňovací odpor síťových zemnicích elektrod a je často velmi obtížné určit zemnicí odpor s požadovanou přesností. Z tohoto důvodu jsou exaktní teoretické rovnice zemnicího odporu užívané pouze pro jednoduché struktury uzemňovacích elektrod za účelem demonstrace vztahu mezi uzemňovacím napětím, rozložením uzemňovacího potenciálu a uzemňovacího proudu. Pro rozšířené a síťové uzemňovací elektrody se používají aproximace uzemňovacího odporu.

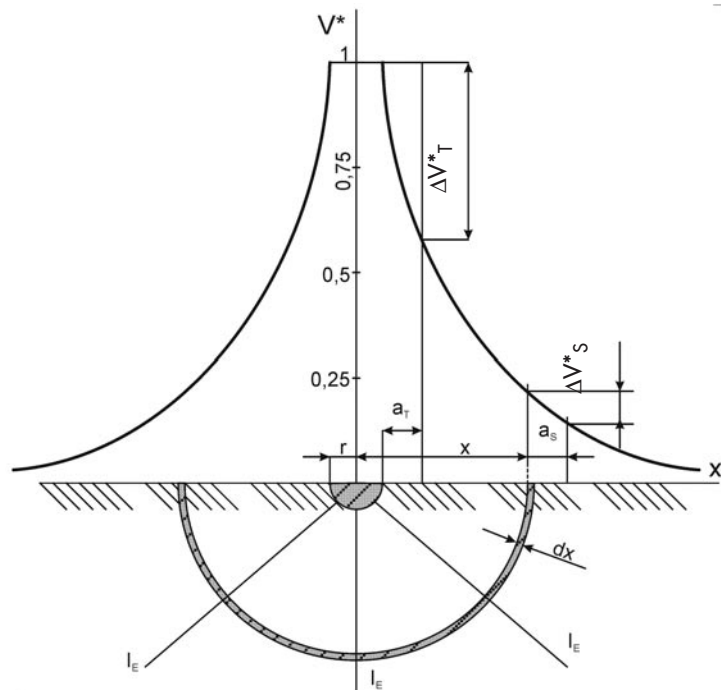
Jednoduchý model konfigurace uzemňovací elektrody, použitý pro ilustraci základních elektrických vlastností, je polokoule zapuštěná v zemi (Obr. 3). Předpokládá se, že uzemňovací proud tekoucí takovouto elektrodou teče radiálně do země. Dále předpokládáme, že povrch polokoule a půlkulové průřezy dx země jsou ekvipotenciálami a křivky proudu jsou proto kolmé na tyto plochy. Za těchto podmínek je odpor polokoule o tloušťce dx a poloměru x vyjádřen následujícím vztahem (předpokládáme konstantní ρ):

$$dR = \frac{\rho}{2\pi \cdot x^2} dx \quad (2)$$

Odpor uzemňovací elektrody tvaru polokoule je vyjádřen jako:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (3)$$

Odpor země značně závisí na tom, jak hluboko je elektroda zapuštěna do země. V hlubších vrstvách země je totiž obsah vlhkosti vyšší a více stabilní. Vrstvy blíže k povrchu jsou více ovlivněny sezónními a krátkodobými změnami počasí a zamrzají. Tento problém je znázorněn na Obr. 4 (pro tyčovou elektrodu). Obrázek znázorňuje znatelné snížení zemnicího odporu s rostoucí hloubkou zapuštění elektrody. Bohužel ne vždy lze elektrody umístit do požadované hloubky. Důvodem jsou geologické problémy, např. skály nebo překážky blízko povrchu, nebo místa kde elektrodový systém pokrývá velkou oblast.

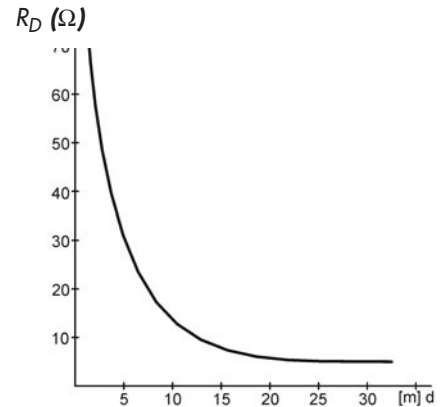


Obr. 3 - Ilustrace pomyslné uzemňovací elektrody tvaru polokoule. Znázorněny jsou parametry pro výpočet zemnicího odporu a rozdělení potenciálu na povrchu země (ρ je konst.)

r	poloměr elektrody
x	zdálenost od středu elektrody
a_T, a_S	dotykové resp. krokové vzdálenosti
V^*	relativní hodnota rozdělení potenciálu
$\Delta V^*_T, \Delta V^*_S$	dotykové resp. krokové napětí

Můžeme rozlišit několik typů uzemňovacích elektrod:

- ♦ jednoduché povrchové uzemňovací elektrody v podobě horizontálně umístěných pásků nebo drátů (volné nebo kruhy)
- ♦ síťové elektrody, konstruované jako mříž položená horizontálně v malé hloubce
- ♦ kabel s odkrytým kovovým pláštěm nebo armatura, které se chovají podobně jako elektrody páskového typu
- ♦ základové uzemňovací elektrody vytvořené z vodivých strukturálních částí zapuštěných v betonové základně, poskytující velkou kontaktní plochu se zemí
- ♦ tyčové elektrody, které se skládají z tyče, trubky apod. a jsou zaraženy nebo zasypány v hloubce větší než jeden metr (obvykle od 3 do 30 metrů nebo více)



Obr. 4 - Příklad rozptylového odporu tyčové elektrody R_D jako funkce hloubky d

První čtyři sestavy jsou povrchovými uzemňovacími elektrodami, které se obvykle skládají z páskových vodičů nebo pásů uspořádaných jako paprskovité, kruhové nebo síťové elektrody (nebo jejich kombinace) zapuštěných v malých hloubkách do 1 metru. Důležitou výhodou těchto konstrukcí je výhodné povrchové rozložení potenciálu. Tyčové elektrody se řadí k tak zvaným hlubinným elektrodám. Jejich výhodou je, že procházejí vrstvami půdy s různou vodivostí a jsou zejména vhodné v oblastech kde mají povrchové vrstvy špatnou vodivost. Tímto způsobem lze snadno dosáhnout očekávaného odporu elektrody (Obr. 4).

Další výhodou tyčových elektrod je možnost instalace i v místech s omezeným prostorem. Protože je však povrchové rozdělení potenciálu u tyčových elektrod nepříliš příznivé, v praxi se také používá kombinace tyčových a povrchových uzemňovacích elektrod pro dosažení dobrého odporu i požadovaného povrchového rozdělení potenciálu. Povrchové rozdělení potenciálu je náplní příští části.

Detailnější popisy a základní rovnice popisující uzemňující odpor typických, výše zmíněných elektrod je uveden v Části 6.5.1.

Uzemňovací napětí a rozdělení povrchového potenciálu

Uzemňovací napětí a rozdělení povrchového potenciálu při toku proudu uzemňovacím systémem je důležitým parametrem pro ochranu před elektrickým šokem. Základní vztahy budou ukázány na uzemňovacím modelu z Obr. 3.

Potenciál jakéhokoliv bodu ve vzdálenosti x od středu uzemňovací elektrody, kterou protéká proud I_E , je možno definovat pomocí následující rovnice:

$$V_x = \frac{\rho I_E}{2\pi x} \quad (4)$$

A jeho relativní hodnotu:
$$V_x^* = \frac{V_x}{V_E} \quad (4a)$$

kde V_E je uzemňovací napětí, které je rovno uzemňovacímu potenciálu (předpokládáme, že potenciál referenční země je roven nule). Uzemňovací potenciál může být popsán vztahem:

$$V_E = I_E R_E = \frac{\rho I_E}{2\pi r} \quad (5)$$

Rozdíl potenciálů mezi dvěma body na zemském povrchu - jeden ve vzdálenosti x a druhý ve vzdálenosti $x+a_s$, kde a_s je rovno jednomu metru - znázorňuje krokový potenciál ΔV tedy potenciál na zemském povrchu existující mezi dvěma chodidly když člověk stojí v daném místě na zemském povrchu:

Uzemňovací systémy - Základy výpočtu a návrh

kde $x \geq r$.

$$V_S = \frac{\rho I_E}{2\pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x+a_S} \right) \quad (6)$$

A jeho relativní hodnota $V_S^* = \frac{V_S}{V_E} \quad (6a)$

Obdobný vztah lze zapsat i pro libovolné jiné vzdálenosti x a a . Speciálně pro $x = r$ a $a = a_T = 1\text{m}$ dovoluje výraz (6) výpočet dotykového napětí, tzn. napětí mezi dlaní a chodidlem osoby která se jen dotýká uzemňovací elektrody nebo kovové části s ní spojené:

$$V_T = \frac{\rho I_E}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+a_T} \right) \quad (7)$$

A její relativní hodnota $V_T^* = \frac{V_T}{V_E} \quad (7a)$

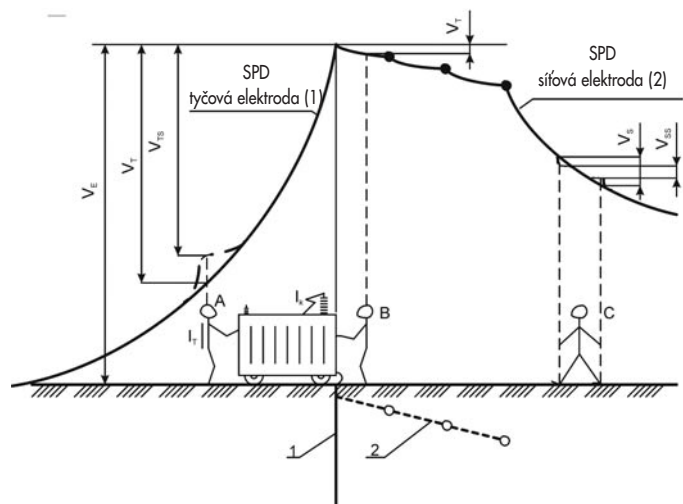
Praktická ukázka dotykového a krokového napětí je znázorněna na Obr. 5. Osoby A a B představují případy dotykového potenciálu, kdežto osoba C znázorňuje krokový potenciál. Dotykové napětí V_T se často rozlišuje od šokového dotykového napětí V_{TS} , (a krokové napětí V_S od šokového krokového napětí V_{SS}). Napětí V_T a V_S jsou čisté hodnoty vyplývající z rozdělení potenciálu, zatímco V_{TS} a V_{SS} představují malé změny v rozdělení potenciálu způsobené tokem šokového (rázového) proudu, tj. zahrnují rušivý efekt proudu protékajícího osobou. V praxi je obvykle rozdíl mezi V_S a V_{SS} nebo V_T a V_{TS} velmi malý proto se většinou předpokládá: $V_S \cong V_{SS}$ a $V_T \cong V_{TS}$.

Levá strana Obr. 5 znázorňuje situaci pro tyčovou elektrodu, kdežto pravá strana pro síťovou elektrodu. Tyčová elektroda (1) má menší odpor, ale nevýhodné rozdělení potenciálu. Síťová elektroda (2) má mnohem plošší profil uzemňovacího potenciálu. Dotykový potenciál (osoba A) je mnohem větší u tyčové elektrody (1) než u síťové (2) (osoba B). Krokové potenciály (osoba C) jsou rovněž méně nebezpečné u síťové elektrody.

Tam kde nelze použít síťové zemnění, představuje použití kruhové elektrody (jak je běžným zvykem např. v Belgii a Německu) vhodné řešení kombinující rozumnou cenu s rozumnou bezpečností.

Zemní odpor určuje hodnotu uzemňovacího napětí, zatímco konfigurace uzemňovací elektrody má významný vliv na rozdělení potenciálu na povrchu země. Samozřejmě konfigurace ovlivňuje také zemní odpor - síťové elektrody jsou v kontaktu s větším objemem země - takže konfiguraci i odpor je nutno posuzovat dohromady.

Všimněme si, že tím že systémy síťových elektrod pokrývají velkou plochu, není příliš praktické zasypávat je příliš hluboko, a tím



Obr. 5 - Porovnání povrchového rozdělení potenciálu (SPD) během toku proudu uzemňovacím systémem pro dvě různé konstrukce elektrod

- 1 Tyčová elektroda
- 2 Síťová elektroda
- V_E zemní napětí
- V_T, V_{TS} dotykové, resp. šokové dotykové napětí
- V_S, V_{SS} krokové, resp. šokové krokové napětí
- I_T šokový dotykový proud
- I_K zkratový proud, který je roven proudu tekoucímu do uzemňovacího systému
- A, B, C Osoby v místech s různým povrchovým potenciálem

jsou více citlivé na změny vlhkosti v půdě. Větší stability odporu je možno dosáhnout zapojením několika vertikálních tyčí do sítě.

Síťové elektrody zvětšují plochu na povrchu, která je vystavena vlivům zvýšeného napětí v důsledku toku proudu do uzemňovací elektrody. V oblasti sítě existuje "ekvipotenciál", ale na okraji se nachází gradient potenciálu, jak je znázorněno na Obr. 6a. Přestože se zde nevyskytuje dotykové napětí - protože vzdálenost sítě od jakékoliv kovové struktury je více než jeden metr - stále se zde může vyskytnout nebezpečné krokové napětí. K této situaci může například dojít v uzemňovacím systému rozvodny. Abychom se vyhnuli tomuto jevu, okrajové části síťové uzemňovací elektrody by měly být zapuštěny do větší hloubky než zbytek sítě (Obr. 6c).

Vlastnosti uzemnění u rázových proudů

Dosud jsme při charakteristikách uzemňovacích systémů předpokládali ustálený tok proudu za stabilních podmínek a při síťové frekvenci. Rozdíly mezi ustáleným stavem a pulsními vlastnostmi uzemňovacího systému jsou způsobeny zejména:

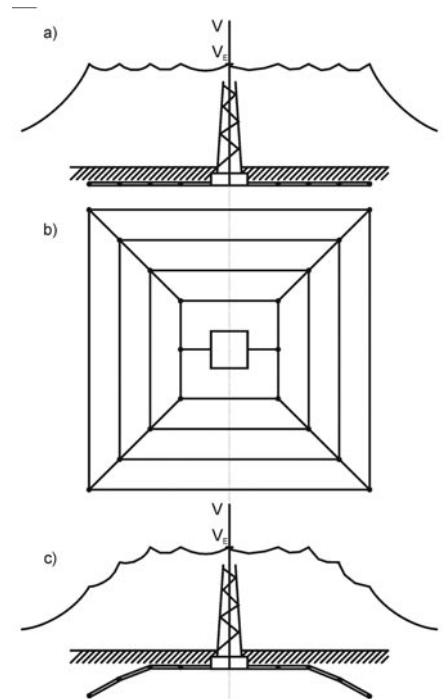
- ♦ tok proudů o velmi vysokých hodnotách, až několika stovek kA
- ♦ velmi rychlé proudové nárůsty - typické údery blesku dosahující několika stovek kA/ μ s.

Extrémně vysoká hustota proudu v půdě zvyšuje intenzitu elektrického pole až k hodnotám, které způsobují elektrické výboje do malých plynových kapes a snižují tak odpor země a zemnicí odpor. K tomuto jevu dochází zejména v blízkosti uzemňovací elektrody, kde je hustota proudu nejvyšší a má největší vliv. Intenzita tohoto jevu je nejvyšší v případech, kdy je půda suchá nebo má velký odpor.

Indukční reaktance kovových částí uzemňovacích elektrod, která je odhadem rovna $1 \mu\text{H}/\text{m}$, je většinou zanedbatelná pokud uvažujeme zemnicí impedanci při síťové frekvenci. Indukční reaktance se však stává důležitým parametrem pokud je rychlost nárůstu proudu vysoká, v oblasti stovek kA/ μ s nebo více. Během úderu blesku dosahuje indukční úbytek napětí ($L \times di/dt$) velmi vysokých hodnot. Důsledkem je menší vliv vzdálených částí uzemňovací elektrody při svádění proudu do země.

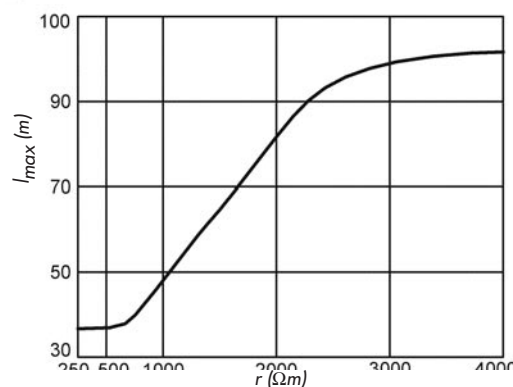
Uzemňovací odpor pulsních proudů se zvyšuje v porovnání s odporem za statických podmínek. Proto zvětšování délky uzemňovacích elektrod za takzvanou kritickou délku (Obr. 7), nesnižuje hodnotu přechodové zemnicí impedance a nevede k omezení přechodných jevů vlivem impedance země.

Během úderu blesku mají vliv oba výše popsané úkazy, ale působí v opačných směrech. Vysoký zemnicí proud snižuje odpor, zatímco vysoké frekvence zvyšují impedanci. Celková impedance může být větší nebo menší v závislosti na tom, který efekt je dominantní.



Obr. 6 - Povrchové rozdělení potenciálu pro dvě síťové uzemňovací elektrody

- a) Síťová rovinná elektroda,
 b) Půdorys elektrody,
 c) Elektroda, jejíž dva poslední elementy jsou umístěny hlouběji



Obrázek 7 - Maximální délka l_{max} bleskových uzemňovacích elektrod jako funkce měrného odporu země ρ

Závěr

Zemní odpor a povrchové rozdělení potenciálu jsou hlavní parametry charakterizující elektrické vlastnosti uzemňovacího systému.

Elektrické parametry uzemňovacího systému závisí na vlastnostech půdy a geometrii uzemňovací elektrody. Vlastnosti půdy jsou charakterizovány měrným odporem země, který nabývá různých hodnot od několika málo Ωm až k několika tisícům Ωm , v závislosti na typu zeminy, její struktuře a vlhkosti. Je tedy velmi obtížné vypočítat přesnou hodnotu zemního odporu. Všechny vztahy popisující zemní odpor jsou odvozeny za předpokladu homogenní struktury země a jejího konstantního odporu.

V ideálním případě by měl být povrchový potenciál plochý v oblasti okolo uzemňovací elektrody. To je důležité pro ochranu před elektrickým šokem, charakterizovaným dotykovým a krokovým napětím. Tyčové elektrody mají nejméně příznivé rozdělení povrchového potenciálu, síťové elektrody mají rozdělení mnohem vyrovnanější.

Je nutné vzít do úvahy i chování uzemňovacího systému při průchodu velkých proudů. Velmi vysoké hodnoty proudu zeslabují zemní odpor vlivem silného elektrického pole mezi uzemňovací elektrodou a půdou. Rychlé změny proudu zvyšují zemní impedanci vlivem indukce uzemňovací elektrody. Zemní impedance je v tomto případě superpozicí obou těchto jevů.

Literatura

- [1] HD 637 S1 'Power installations exceeding 1 kV a.c', 1999.
- [2] ABB Switchgear Manual, 10th edition, Dusseldorf, Cornelsen Verlag 1999.
- [3] IEC 364-5-54: 1980 'Electrical installations of buildings - Part 5: Selection and erection of electrical equipment - Chapter 54: Earthing arrangements and protective conductors'
- [4] Rudolph W., Winter O. EMV nach VDE 0100. VDE-Schriftenreihe 66. VDE-Verlag GmbH. Berlin, Offenbach, 1995.

Reference & Founding Partners

European Copper Institute
(ECI)

Web: www.eurocopper.org

Akademia Gorniczko-Hutnicza
(AGH)

Web: www.agh.edu.pl

Centre d'Innovació Tecnològica en
Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)

Web: www-citcea.upc.es

Comitato Elettrotecnico Italiano
(CEI)

Web: www.ceiuni.it

Copper Benelux

Web: www.copperbenelux.org

Copper Development Association
(CDA UK)

Web: www.cda.org.uk

Deutsches Kupferinstitut
(DKI)

Web: www.kupferinstitut.de

Engineering Consulting & Design
(ECD)

Web: www.ecd.it

Hochschule für Technik und Wirtschaft
(HTW)

Web: www.htw-saarland.de

Istituto Italiano del Rame
(IIR)

Web: www.iir.it

International Union of Electrotechnology
(UIE)

Web: www.uie.org

ISR - Universidade de Coimbra

Web: www.uc.pt

Katholieke Universiteit Leuven
(KU Leuven)

Web: www.kuleuven.ac.be

La Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Industriales (ETSII)

Web: www.etsii.upm.es

Polish Copper Promotion Centre
(PCPC)

Web: www.miedz.org.pl

Provinciale Industriële Hogeschool
(PIH)

Web: www.pih.be

Università di Bergamo

Web: www.unibg.it

University of Bath

Web: www.bath.ac.uk

University of Manchester Institute of
Science and Technology (UMIST)

Web: www.umist.ac.uk

Wroclaw University of Technology

Web: www.pwr.wroc.pl

Editorial Board

David Chapman (Chief Editor)	CDA UK	david.chapman@copperdev.co.uk
Prof Angelo Baggini	Università di Bergamo	angelo.baggini@unibg.it
Dr Araceli Hernández Bayo	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid	ahernandez@etsii.upm.es
Prof Ronnie Belmans	UIE	ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be
Franco Bua	ECD	franco.bua@ecd.it
Prof Anibal de Almeida	ISR - Universidade de Coimbra	adealmeida@isr.uc.pt
Hans De Keulenaer	ECI	hdk@eurocopper.org
Gregory Delaere	Lemcko	gregory.delaere@howest.be
Prof Jan Desmet	Hogeschool West-Vlaanderen	jan.desmet@howest.be
Dipl-Ing Marcel Didden	KU Leuven	marcel.didden@mech.kuleuven.ac.be
Dr Johan Driesen	KU Leuven	johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
Stefan Fassbinder	DKI	sfassbinder@kupferinstitut.de
Prof Zbigniew Hanzelka	Akademia Gorniczko-Hutnicza	hanzel@uci.agh.edu.pl
Dr Antoni Klajn	Wroclaw University of Technology	antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Reiner Kreutzer	HTW	rkreutzer@htw-saarland.de
Prof Wolfgang Langguth	HTW	wlang@htw-saarland.de
Jonathan Manson	Gorham & Partners Ltd	jonathanm@gorham.org
Prof Henryk Markiewicz	Wroclaw University of Technology	henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Carlo Masetti	CEI	masetti@ceiuni.it
Dr Jovica Milanovic	UMIST	jovica.milanovic@umist.ac.uk
Dr Miles Redfern	University of Bath	eesmar@bath.ac.uk
Andreas Sumper	CITCEA	sumper@citcea.upc.es
Roman Targosz	PCPC	cem@miedz.org.pl



Prof Henryk Markiewicz



Wrocław University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
Poland

Tel: 00 48 71 3203 424
Fax: 00 48 71 3203 596
Email: henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Web: www.pwr.wroc.pl



Dr Antoni Klajn



Wrocław University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
Poland

Tel: 00 48 71 3203 920
Fax: 00 48 71 3203 596
Email: antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Web: www.pwr.wroc.pl



HUNGARIAN COPPER
PROMOTION CENTRE

Hungarian Copper Promotion
Centre
Képiró u. 9
H - 1053 Budapest
Magarsko
Tel.: 00 361 266 4810
Tel.: 00 361 266 4804
E-mail: hpcp@euroweb.hu
Website: www.hpcinfo.org



VŠB-TU Ostrava
Fakulta elektrotechniky
a informatiky
Katedra elektroenergetiky
17. listopadu 15
CZ 708 33 Ostrava-Poruba
Tel.: +420 597324279
Tel.: +420 596919597
E-mail: pavel.santarius@vsb.cz
Website: homen.vsb.cz/san50/



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B - 1150 Brussels
Belgium

Tel.: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org