

Zuzana Jacková, Stanislav Ilenin

Uzemňovacie sústavy do 22 kV

Abstrakt Tento príspevok sa zaoberá problematikou uzemňovacích sústav používaných v sieťach s menovitým napätím nepresahujúcim 22 kV. Opisuje požiadavky, ktoré sú na uzemňovacie sústavy kladené a faktory, ktoré najviac vplyvajú na kvalitu uzemňovacej sústavy. V súčasnosti sú na uzemňovanie sietí s menovitým napätím nepresahujúcim 22 kV najčastejšie používané uzemňovacie pásy, ktoré však nie je možné použiť v husto zastavaných oblastiach, kvôli ich priestorovej náročnosti. Cieľom tohto príspevku je navrhnúť rôzne typy uzemňovačov, ktoré sú menej priestorovo náročné, no zároveň vhodné na uzemnenie sietí s menovitým napätím nepresahujúcim 22 kV.

Kľúčové slová: uzemňovacia sústava, návrh uzemňovacej sústavy, odpor uzemnenia, rezistivita pôdy, uzemňovač

This paper deals with the problem of earthing systems used in networks with a nominal voltage not exceeding 22 kV. It describes the requirements that are required on the earthing systems and the factors that most influence the quality of the grounding system. At present, earthing belts are the most commonly used earthing systems for earths with a rated voltage not exceeding 22 kV, but can not be used in densely populated areas because of their spatial demands. The aim of this paper is to design different types of earthing electrodes that are less space-intensive but also suitable for grounding networks with a rated voltage not exceeding 22 kV (**Earthing systems up to 22 kV**)

Keywords: earthing system, grounding system design, earthing resistance, earth resistivity, earthing

I. ÚVOD

V bezporuchovej prevádzke preteká elektrickým obvodom menovitý prúd pri stálom menovitom napätí. Vznik poruchy vyvolá zmenu pomerov v elektrickom obvode, dôsledkom čoho môže byť vznik prepätí alebo nebezpečných rozdielov potenciálov medzi jednotlivými časťami elektrického obvodu [1]. Nepriaznivé účinky porúch na správnu funkciu a bezpečnosť elektrických zariadení môžeme eliminovať, ak neživé časti elektrických zariadení spoľahlivo uzemníme [2]. Pri návrhu uzemnenia je potrebné sa riadiť príslušnými normami. Hlavným ukazovateľom kvality uzemňovacej sústavy je hodnota odporu uzemnenia. Ak bude uzemňovacia sústava vyhotovená v súlade s požiadavkami príslušných noriem, hodnota odporu uzemnenia bude ovplyvnená hlavne rezistivitou pôdy v mieste zariadenia uzemňovacej sústavy [3]. V súčasnosti sa v distribučných sieťach s napätím neprevyšujúcim 22 kV ako uzemňovače často používajú uzemňovacie pásy, ktoré sú kvôli ich dĺžke náročné na priestor. Ak nie je k dispozícii dostatok priestoru na umiestnenie uzemňovacích pásov je potrebné použiť uzemňovače, ktoré budú menej priestorovo náročné a zároveň budú vhodné na uzemnenie z hľadiska odporu uzemnenia. V tomto príspevku je uvedené porovnanie niektorých typov uzemňovačov, ktoré by mohli byť v praxi vhodnou a priestorovo úspornou náhradou za uzemňovacie pásy.

II. TEORETICKÝ ROZBOR UZEMŇOVACÍCH SÚSTAV

Uzemňovacia sústava je súbor prepojení a zariadení, pomocou ktorého sa uzemňované zariadenie spoľahlivo spojí so zemou [4]. Cieľom uzemnenia je udržať uzemňované zariadenie na potenciály čo najbližšie k potenciálu zeme. Uzemňovacia sústava musí spoľahlivo zvieŕť poruchový prúd do zeme, čo sa dosiahne ak bude hodnota odporu uzemnenia uzemňovacej sústavy dostatočne nízka.

Ak má uzemňovač dostatočne veľké rozmery, bol správne uložený do pôdy a zároveň, ak spoj medzi uzemňovačom a uzemňovacím vodičom je dostatočne elektricky spoľahlivý, bude odpor uzemnenia závislý hlavne od elektrickej rezistivity pôdy v okolí uzemňovača. V homogénnej pôde sa pri prechode prúdu uzemňovačom vytvoria v jeho okolí hladiny rovnakého napätia, pričom odpor pôdnej vrstvy a hustota prúdu v bezprostrednom okolí uzemňovacej elektródy budú dosahovať najvyššie hodnoty. Odpor uzemnenia bude daný súčtom odporov pôdnych vrstiev v okolí uzemňovacej elektródy. So zväčšujúcou sa vzdialenosťou od uzemňovacej elektródy klesá hustota prúdu aj odpor pôdnych vrstiev. Odpor pôdnej vrstvy vo veľkej vzdialenosti od uzemňovacej elektródy, bude prispievať k celkovému odporu uzemnenia len zanedbateľne. Vo veľkej vzdialenosti od uzemňovacej elektródy dosiahne teda odpor uzemnenia konečnú hodnotu. Ak má uzemňovacia elektróda polomer 0,5 metra dosiahne odpor uzemnenia konečnú hodnotu vo vzdialenosti 20 metrov od stredu uzemňovacej elektródy. Na meranie odporu uzemnenia medzi uzemňovačom a vrstvou pôdy vo veľkej vzdialenosti sa používajú pomocné elektródy [5]. Najčastejšie používanými metódami na meranie odporu uzemnenia sú Mostíková a Voltampérová metóda.

Keďže elektrická rezistivita pôdy významne ovplyvňuje hodnotu odporu uzemnenia, je dôležité poznať faktory, ktoré majú vplyv na hodnotu rezistivity pôdy. Na rezistivitu pôdy má vplyv hlavne vek hornín obsiahnutých v pôde, množstvo kapilárnej vody a solí v pôde a taktiež vonkajšia teplota. Všeobecne platí, že čím je hornina staršia, tým má vyššiu rezistivitu a lepšie izolačné vlastnosti. Medzi horniny s vysokou rezistivitou patrí napríklad čadič, žula a pieskovec. Tieto horniny nie sú vhodné na uzemňovanie. Kapilárna voda sa udržuje v jemných kapilárach na povrchu pôdnych častíc. Hlinité a rašelinové či vlhké ílovité pôdy obsahujú veľké množstvo jemných kapilár, v ktorých sa voda povrchovým napätím udržuje. Vďaka kapilárnej vode si tieto pôdy dokážu udržať vlhkosť dlhodobo a preto sú vhodné na umiestnenie uzemňovačov. V pieskových pôdach sú priestory medzi

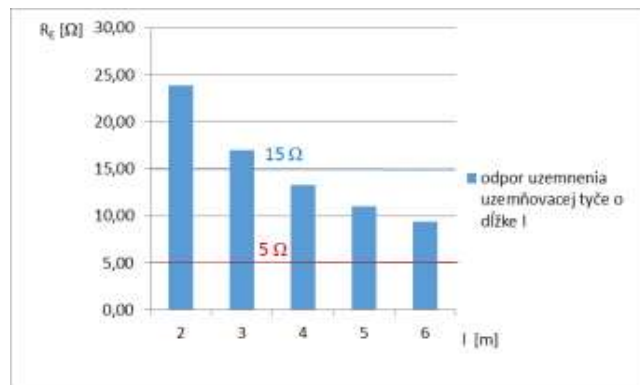
časticami veľké a kapilárna voda sa v nich nedokáže udržať. Pieskové pôdy teda rýchlo vysychajú, čím sa zvyšuje ich rezistivita a preto nie sú vhodné na umiestnenie uzemňovačov. Vodivosť pôdy ovplyvňuje aj obsah solí v pôde, pričom platí, že čím vyšší je obsah solí rozpustených v pôde, tým vyššia je aj vodivosť pôdy. Posledným faktorom, ktorý výrazne ovplyvňuje rezistivitu pôdy je vonkajšia teplota. Zamŕzanie pôdy v zime, ako aj vysušenie pôdy v lete, zvyšujú jej rezistivitu. Elektrická rezistivita pôdy sa meria Wennerovou metódou. Z nameraného odporu sa následne vypočíta rezistivita pôdy, ktorá je potrebná pri výpočte odporu uzemnenia [5].

Aby uzemňovacia sústava plnila spoľahlivo svoju funkciu musia byť všetky jej časti vyhotovené podľa požiadaviek aktuálne platných noriem. Pri návrhu uzemňovacej sústavy sa musí taktiež dbať na správne nadimenzovanie uzemňovacej sústavy. Požiadavky pre návrh a vyhotovenie uzemňovacej sústavy pre inštalácie nízkeho napätia uvádzajú normy STN 33 2000-5-54 a STN 33 2000-4-41 [6][7]. Požiadavky na uzemňovacie sústavy pre inštalácie s napätím prevyšujúcim 1 kV uvádzajú normy STN EN 50522 a STN EN 61936-1 [8][9].

III. POROVNANIE RÔZNYCH TYPOV UZEMŇOVAČOV Z HĽADISKA ODPORU UZEMNENIA POUŽÍVANÝCH V NÍZKONAPĚTOVÝCH DISTRIBUČNÝCH SÍŤACH

V nasledujúcej časti je skúmané, ktoré typy uzemňovačov sú priestorovo úspornou a z hľadiska odporu uzemnenia vhodnou náhradou za uzemňovacie pásy. Podľa normy STN 33 2000-4-41 môže hodnota odporu uzemnenia (R_E) v trase distribučného vedenia dosahovať maximálne 15 Ω a na koncoch odbočiek distribučného vedenia má mať odpor uzemnenia hodnotu najviac 5 Ω [7].

Bude sa uvažovať použitie samostatnej uzemňovacej tyče a taktiež paralelne prepojené tyče usporiadané v kruhu s priemerom maximálne osem metrov, ktoré by mohli byť v praxi vhodnou náhradou za uzemňovacie pásy.

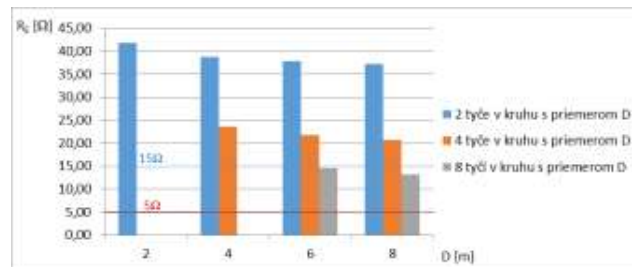


Obr. 1. Odpor uzemnenia uzemňovacej tyče o dĺžke l , pri rezistivite pôdy 50 Ωm , so zohľadnením medzných hodnôt pre NN inštalácie

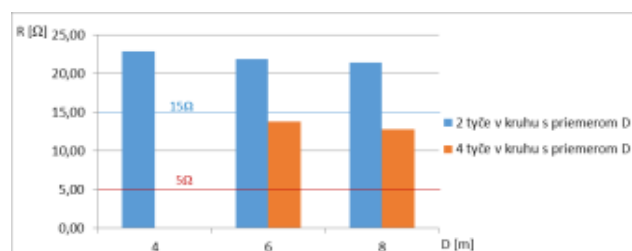
Ako je možné vidieť na grafe, na uzemnenie ochranných vodičov v trase nízkonapäťového vedenia je možné použiť uzemňovaciu tyč s dĺžkou aspoň štyri metre, ak rezistivita pôdy nepresiahne 50 Ωm . Pri vyšších rezistivitách pôdy ako 50 Ωm sa odporúča na uzemnenie ochranných vodičov pozdĺž vedenia použiť iný typ uzemňovača alebo použiť tyč dlhšiu ako šesť metrov. Na uzemnenie koncov odbočiek nie je samostatná uzemňovacia tyč vhodná, kvôli vysokej hodnote odporu uzemnenia.

Na uzemnenie je možné okrem samostatných uzemňovacích tyčí použiť aj paralelne prepojené tyče usporiadané v kruhu. V našom

případe sme uvažovali s priemerom kruhu maximálne osem metrov a dĺžkou tyčí nepresahujúcou štyri metre. Za daných podmienok je možné tento typ uzemňovača použiť v pôdach s rezistivitou nie vyššou ako 200 Ωm .



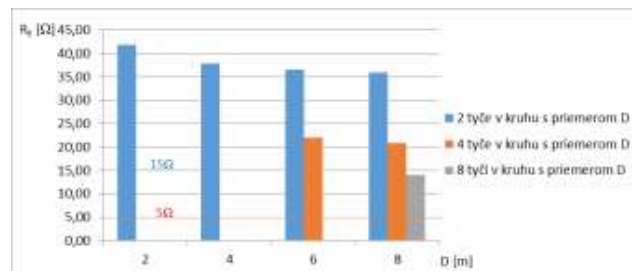
Obr. 2. Odpor uzemnenia dvoch až ôsmich paralelne prepojených tyčí o dĺžke 2 m, umiestnených v kruhu s priemerom D , pri rezistivite pôdy 150 Ωm , so zohľadnením medzných hodnôt pre NN inštalácie



Obr. 3. Odpor uzemnenia dvoch a štyroch paralelne prepojených tyčí o dĺžke 4 m, umiestnených v kruhu s priemerom D , pri rezistivite pôdy 150 Ωm , so zohľadnením medzných hodnôt pre NN inštalácie

Z porovnávaných usporiadaní je na uzemnenie ochranných vodičov v trase vedenia z hľadiska úspory priestoru, najvhodnejšie použiť paralelne prepojené tyče usporiadané v kruhu s priemerom šesť metrov. V pôdach kde rezistivita nepresiahne 100 Ωm , je vhodné použiť dve až štyri štvormetrové tyče alebo štyri až osem dvojmetrové tyče.

Ako je možné vidieť na obrázku 2 a obrázku 3, z hľadiska rozsahu použitia sa ako vhodnejšie javí použitie štyroch štvormetrových alebo ôsmich dvojmetrových tyčí, pretože tieto tyče je možné použiť v pôde s rezistivitou až 150 Ωm , pričom nemusíme zväčšovať priemer kruhu nad šesť metrov.



Obr. 4. Odpor uzemnenia dvoch až ôsmich paralelne prepojených tyčí o dĺžke 3 m, umiestnených v kruhu s priemerom D , pri rezistivite pôdy 200 Ωm , so zohľadnením medzných hodnôt pre NN inštalácie

V pôdach s rezistivitou do 200 Ωm , je na uzemnenie ochranných vodičov v trase distribučného vedenia, z porovnávaných uzemňovačov, vhodný len uzemňovač z ôsmich trojmetrových tyčí usporiadaných v kruhu s priemerom aspoň osem metrov. Na obrázku 2, obrázku 3 a obrázku 4 je možné vidieť, že so zväčšujúcim sa priemerom kruhu klesá odpor uzemnenia uzemňovača s daným usporiadaním. Na uzemnenie ochranných vodičov v trase by sa teda

mohli použiť aj uzemňovače s priemerom kruhu väčším ako šesť resp. osem metrov, úspora priestoru by sa tým ale znížila.

IV. POROVNANIE RÔZNYCH TYPOV UZEMŇOVAČOV Z HĽADISKA ODPORU UZEMNENIA POUŽÍVANÝCH VO VYSOKONAPĚŤOVÝCH DISTRIBUČNÝCH SIETACH

Pre uzemňovacie systémy vo vysokonapät'ových inštaláciách je potrebné na určenie dovolenej hodnoty odporu uzemnenia (R_E) poznať hodnotu dovoleného dotykového napätia (U_{TP}). Táto hodnota závisí od doby trvania poruchy a spôsob jej určenia je opísaný v STN EN 50522 [8]. Ak je známa hodnota U_{TP} a hodnota prúdu tečúceho do zeme I_E , je možné medznú hodnotu odporu uzemnenia určiť zo vzťahov :

$$R_E \leq 2 \cdot U_{TP} / I_E \quad \text{ak nie sú použité špecifické opatrenia}$$

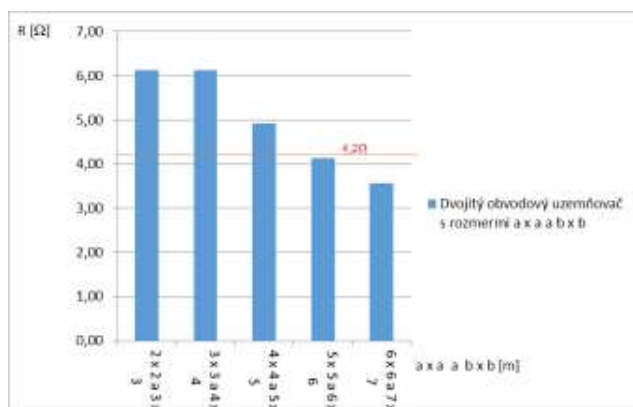
$$R_E \leq 4 \cdot U_{TP} / I_E \quad \text{v prípade vykonania špecifických opatrení}$$

Pre doby trvania poruchy dlhšie ako 10 s sa podľa normy volí hodnota $U_{TP} = 80$ V. Dlhé doby trvania poruchy sú príznačné pre rezonančne uzemnené siete. Hodnota prúdu tečúceho do zeme I_E sa v rezonančne uzemnených sieťach určí ako 10 % z hodnoty kapacitného poruchového prúdu I_c . V našom prípade $I_E = 37,7$ A. Dovoľená hodnota odporu uzemnenia v rezonančne uzemnených sieťach teda bude :

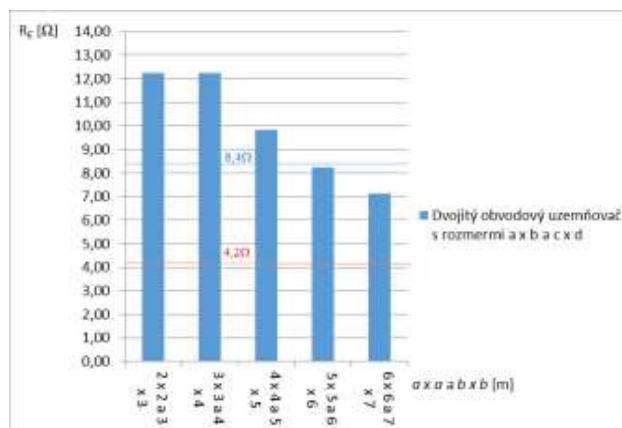
$$R_E \leq 2.80/37,7 \quad R_E \leq 4,2 \, \Omega \quad \text{ak nie sú použité špecifické opatrenia [1]}$$

$$R_E \leq 4.80/37,7 \quad R_E \leq 8,4 \, \Omega \quad \text{v prípade vykonania špecifických opatrení [1]}$$

V rezonančne uzemnených sieťach sme uvažovali okrem použitia paralelne prepojených tyčí usporiadaných v kruhu aj použitie obvodového, kruhového aj dvojitého obvodového uzemňovača. Podmienkou bolo, aby dĺžka strany obvodového uzemňovača alebo priemer kruhového uzemňovača nepresiahol osem metrov. Za daných podmienok je možné tieto typy uzemňovačov použiť ako náhradu za uzemňovacie pásy ak rezistivita pôdy nepresiahne 100 Ω m. Taktiež sme uvažovali s použitím kombinovaného obvodového uzemňovača a tyčí, pričom dĺžka strany uzemňovača nepresahovala sedem metrov. Za daných podmienok je možné tieto typy uzemňovačov použiť ako náhradu za uzemňovacie pásy, ak rezistivita pôdy nepresiahne 200 Ω m.



Obr. 5. Odpor uzemnenia dvojitého obvodového uzemňovača s rozmermi $a \times a$ a $b \times b$, pri rezistivite pôdy 50 Ω m so zohľadnením medzných hodnôt pre rezonančne uzemnené VN inštalácie



Obr. 6. Odpor uzemnenia dvojitého obvodového uzemňovača s rozmermi $a \times b$ a $c \times d$, pri rezistivite pôdy 100 Ω m so zohľadnením medzných hodnôt pre rezonančne uzemnené VN inštalácie

Z porovnávaných uzemňovačov poskytujú najväčšiu úsporu priestoru dvojité obvodové uzemňovače. Za daných podmienok je možné tento typ uzemňovača použiť v pôdach s rezistivitou neprevyšujúcou 100 Ω m. V pôdach kde rezistivita nepresahuje 50 Ω m a vykonajú sa špecifické opatrenia, je možné použiť dvojité obvodové uzemňovače, ktorého dĺžka vnútornej strany je aspoň dva a vonkajšej aspoň tri metre. V prípade, že dĺžka vnútornej strany bude aspoň päť a vonkajšej aspoň šesť metrov nie je nutné vykonať špecifické opatrenia. V pôde s rezistivitou neprevyšujúcou 100 Ω m, je možné použiť dvojité obvodové uzemňovače, ktorého dĺžka vnútornej strany je aspoň päť a vonkajšej aspoň šesť metrov, pričom sa musia vykonať špecifické opatrenia.

Rovnaká úspora priestoru sa dosiahneme ak sa použije obvodový uzemňovač tvaru štvorca so šesť metrovou stranou, doplneného tyčami s maximálnou dĺžkou päť metrov. Obvodový uzemňovač s dĺžkou strany šesť alebo sedem metrov doplnený tyčami, je možné použiť na uzemnenie aj v pôdach s rezistivitou nepresahujúcou 150 Ω m. V pôdach, ktorých rezistivita nepresiahne 200 Ω m, je z porovnávaných typov uzemňovačov vhodné použiť len obvodový uzemňovač s dĺžkou sedem metrov doplnený ôsmimi trojmetrovými tyčami.

Pre nízkoimpedančne uzemnené siete sú typické krátke časy trvania poruchy v rozmedzí 0,4 s až 0,5 s. V našom prípade sme zvolili čas trvania poruchy 0,5 s. Pre tento čas poruchy stanovuje norma STN EN 50522 hodnotu dotykového napätia $U_{TP} = 220$ V. Hodnoty prúdu tečúceho do zeme cez nízku impedanciu sme zvolili $I_{E1} = 420$ A $I_{E2} = 810$ A. Tieto hodnoty prúdov zodpovedajú hodnotám, ktoré sa vo vysokonapät'ových inštaláciách vyskytujú v praxi. Pre dané hodnoty napätia a prúdu sú dovolené hodnoty odporu uzemnenia nasledovné :

$$R_E \leq 2.220/420 \quad R_{E1} \leq 1,05 \, \Omega \quad \text{ak nie sú použité špecifické opatrenia}$$

$$R_E \leq 2.220/810 \quad R_{E2} \leq 0,54 \, \Omega \quad \text{ak nie sú použité špecifické opatrenia}$$

$$R_E \leq 4.220/420 \quad R_{E1} \leq 2,10 \, \Omega \quad \text{za predpokladu použitia špecifických opatrení [1]}$$

$$R_E \leq 4.220/810 \quad R_{E2} \leq 1,09 \, \Omega \quad \text{za predpokladu použitia špecifických opatrení [1]}$$

Pre siete uzemnené cez nízku impedanciu sa pri porovnaní uvažovali také isté typy uzemňovačov ako v rezonančne uzemnených sieťach. Uvedené dovolené hodnoty odporu uzemnenia nedosahoval ani jeden z porovnávaných uzemňovačov. Na uzemnenie tohto typu siete sú podľa porovnania vhodné len uzemňovacie pásy. V prípade, že na uzemnenie nie je možné použiť uzemňovacie pásy, môže byť ochrana pred nebezpečným rozdielom potenciálov pri poruche zabezpečená zariadením ekvipotenciálnych kruhov. Aj keď v normách v súčasnosti platných, sa tento spôsob ochrany pred nebezpečným krokovým a dotykovým napätím neuvádza, u špecialistov, ktorí vykonávajú úradné skúšky je akceptovaný. Odpor uzemnenia je možné taktiež znížiť použitím chemických zmesí aplikovaných do zeme v okolí uzemnenia. Požiadavky a skúšky na zmesi zlepšujúce uzemnenie popisuje európska norma EN 62561. Účinok týchto zmesí však nie je trvalý a na Slovensku preto nie sú zmesi na zníženie odporu uzemnenia využívané vo veľkej miere.

V. ZÁVER

V tomto článku sú publikované výsledky porovnania rôznych typov uzemňovačov, ktorého cieľom bolo nájsť priestorovo úspornú náhradu za často využívané, no priestorovo náročné uzemňovacie pásy. Z výsledkov porovnania vyplýva, že na uzemnenie ochranných vodičov nízkonapäťových inštalácií v trase vedenia je najúspornejším riešením použitie samostatnej uzemňovacej tyče s dĺžkou aspoň štyri metre, ak rezistivita pôdy neprevyšuje 50 Ωm . Ak rezistivita pôdy bude vyššia ako 50 Ωm , no nepresiahne 150 Ωm je priestorovo najúspornejším riešením použitie ôsmich dvojmetrovo tyčí usporiadaných v kruhu s priemerom aspoň šesť metrov. Ak rezistivita pôdy bude vyššia ako 150 Ωm , no nepresiahne 200 Ωm je priestorovo najúspornejším riešením použitie ôsmich trojmetrovo tyčí usporiadaných v kruhu s priemerom aspoň osem metrov. V pôdach s rezistivitou vyššou ako 200 Ωm nie je možné na uzemnenie nízkonapäťových inštalácií použiť uzemňovač z paralelne prepojených tyčí usporiadaných v kruhu s priemerom do osem metrov.

Z porovnania taktiež vyplýva, že v rezonančne uzemnených vysokonapäťových sieťach poskytuje najväčšiu úsporu priestoru v pôdach s rezistivitou do 100 Ωm , použitie dvojitého obvodového uzemňovača. V pôdach, ktorých rezistivita je vyššia ako 100 Ωm , ale nepresahuje 200 Ωm je priestorovo najúspornejšie použiť obvodový uzemňovač doplnený tyčami so stranou dlhou aspoň šesť alebo sedem metrov. V pôdach, kde rezistivita presahuje 200 Ωm nie je možné použiť na uzemnenie žiadny z porovnávaných uzemňovačov.

V nízkoimpedančne uzemnených sieťach nie je možné použiť žiadny z porovnávaných uzemňovačov, kvôli ich vysokej hodnote odporu uzemnenia. Ak odpor uzemnenia prekračuje dovolené hodnoty je možné ochranu pred nebezpečným dotykovým a krokovým napätím zabezpečiť zariadením ekvipotenciálnych kruhov alebo aplikovať do pôdy v okolí uzemnenia chemické zmesi na zníženie hodnoty odporu uzemnenia.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0372/18.

LITERATÚRA

- [1] M. Kolcun, M. Kanálik, D. Medveď, Z. Čonka, Measuring of real value of short-circuit power in Island Operation Condition, In: Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VŠB-TU, 2015, p. 418-422. ISBN 978-1-4673-6787-5.
- [2] D. Medveď, M. Klešč, Modeling of electrical off-grid network in the simscape power systems, In: ELEKTROENERGETIKA 2017. Košice: TU, 2017, p. 465-470. ISBN 978-80-553-3195-9.
- [3] D. Medveď, Utilising of EMTP ATP for Modelling of Decentralized Power Sources Connection. In: Transactions on electrical engineering. Vol. 2, no. 1 (2013), p. 26-29. - ISSN 1805-3386.
- [4] D. Medveď, Z. Čonka, M. Kolcun, M. Kosterec, Solution of transient phenomena during the connection of the photovoltaic power plants, In: EPE 2017. - Ostrava: VŠB-TU, 2017, p. 643-648. ISBN 978-1-5090-6405-2.
- [5] J. Osolsobě, M. Zapletal, Zemnění a bezpečnost. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1964, 778 s.
- [6] STN 33 2000-5-54: 2008. Elektrické inštalácie nízkeho napätia, Časť 5-54: Výber a stavba elektrických zariadení, Uzemňovacie sústavy, ochranné vodiče a vodiče na ochranné pospájanie
- [7] STN 33 2000-4-41: 2007. Elektrické inštalácie nízkeho napätia, Časť 4-41: Zaistenie bezpečnosti, Ochrana pred zásahom elektrickým prúdom
- [8] STN EN 50522: 2011. Uzemňovanie silnoprúdových inštalácií na striedavé napätie neprevyšujúce 1 kV
- [9] STN EN 61936-1: 2011. Silnoprúdové inštalácie na striedavé napätia prevyšujúce 1 kV, Časť 1: Spoločné pravidla

ADRESY AUTOROV

Zuzana Jacková, Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Másiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, zuzana.jackova2@student.tuke.sk
 Stanislav Ilenin, Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Másiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, stanislav.ilenin@tuke.sk