

Modelowanie uziemień w gruncie niejednorodnym

Streszczenie. Podstawowym parametrem uziemienia jest jego rezystancja. Zależy ona głównie od rozmiaru uziemienia oraz rezystywności gruntu. W rzeczywistych warunkach grunt ma strukturę niejednorodną. W uproszczonych zależnościach na rezystancję uziemienia zakłada się grunt jednorodny o tak zwanej rezystywności zastępczej. Z wykorzystaniem specjalizowanego oprogramowania możliwa jest dokładniejsza analiza uziemień pograżonych w gruncie niejednorodnym pod względem geoelektrycznym. Uwzględnia się niejednorodność gruntu w postaci uwarstwienia poziomego lub pionowego oraz w postaci występujących w gruncie obszarów o kształcie kulistym, walcowym lub wielościennym.

Abstract. The basic parameter of the grounding system is the resistance. It mainly depends on the size and the earth resistivity. In real conditions, the soil has a heterogeneous structure. The simplified formulas on ground resistance assumes a homogeneous soil resistivity replacement. With the use of specialized software can be more accurate analysis of earth buried in the ground heterogeneous. Takes into account the heterogeneity of the soil in a horizontal or vertical stratification and as occurring in the soil of areas with spherical, cylindrical or solids. (**Modeling of the grounding systems buried in heterogeneous soil**).

Słowa kluczowe: rezystancja uziemienia, modelowanie, niejednorodny grunt.

Keywords: grounding resistance, modeling, heterogeneous soil.

doi:10.12915/pe.2014.01.27

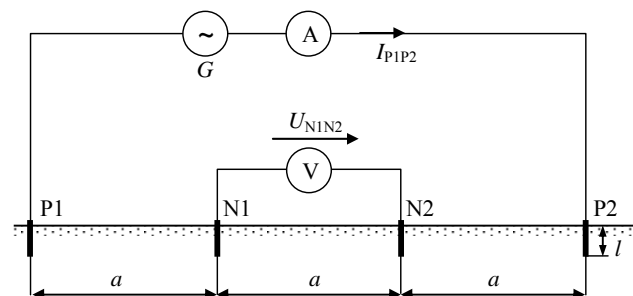
Wstęp

Analizując własności uziemień, podstawowym ich parametrem, brany pod uwagę zarówno przy wymuszeniach wolnozmiennych jak i przy prądach udarowych jest ich rezystancja (impedancja) wejściowa. Przy wymuszeniach wolnozmiennych i o małych wartościach prądu rozpatruje się rezystancję statyczną uziemienia R_{st} , zależną głównie od konfiguracji (rozmiaru) uziemienia oraz budowy geoelektrycznej otaczającego gruntu. Przy prądach udarowych w uziomach zachodzą zjawiska falowe związane z dużą szybkością zmian wartości prądu oraz zjawiska wysokoprądowe powodujące proces jonizacji w gruncie. W uproszczonych analizach oblicza się wtedy rezystancję udarową daną zależnością $R_u = \alpha_u R_{st}$, gdzie α_u jest współczynnikiem udarowym zależnym od rezystywności gruntu, wymiarów uziemienia, szybkości zmian prądu i od jego wartości szczytowej [1, 2]. W dokładniejszych analizach własności układów uziomowych, wykorzystuje się symulatory cyfrowe (EMTP, PSPICE), bazujące na modelach obwodowych, w których implementuje się schematy zastępcze przewodów uziemienia [3]. Najbardziej zaawansowane modele uziemień implementowane są w symulatorach bazujących na cyfrowych metodach obliczania pola elektromagnetycznego jak metody siatkowe (różnic skończonych oraz elementów skończonych) lub metoda momentów (MoM). W pracy zaprezentowane zostały wyniki obliczeń w pakiecie CDEGS [4] bazującego na metodzie momentów. Podano wartości rezystancji uziemień pograżonych w gruncie niejednorodnym. Wybrane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi z uproszczonych zależności analitycznych.

Badanie rezystywności gruntu

Rezystywność gruntu oraz rozmiary i konfiguracja układu uziomowego są głównymi czynnikami wpływającymi na wartość jego rezystancji. Aby móc na etapie projektowania uziomu wyznaczyć wartość jego rezystancji należy przeprowadzić badanie charakterystyki geoelektrycznej gruntu. Można wtedy wykryć występujące niejednorodności gruntu i następnie uwzględnić je w obliczeniach. Niejednorodności gruntu mogą być w postaci uwarstwienia poziomego lub pionowego a także w postaci obszarów półkulistych lub cylindrycznych. Niejednorodności będące wytworem człowieka mogą być także w postaci dowolnych brył wielościennych reprezentujących na przykład fundamenty konstrukcji budowlanych (budynki, elektrownie wiatrowe itp.).

Badanie rezystywności gruntu najczęściej wykonuje się metodą 4-o elektrodową Wenner'a [5] w układzie jak na rysunku 1. Układ ten składa się z umieszczonych w jednej linii czterech elektrod: dwóch elektrod prądowych P1 i P2 oraz dwóch elektrod napięciowych N1 i N2.



Rys.1. Układ do pomiaru rezystywności gruntu metodą cztero elektrodową Wenner'a

Za pomocą generatora G wywołuje się przepływ przez elektrody prądowe w gruncie prądu I_{P1P2} . Elektrody napięciowe służą do pomiaru spadku napięcia U_{N1N2} .

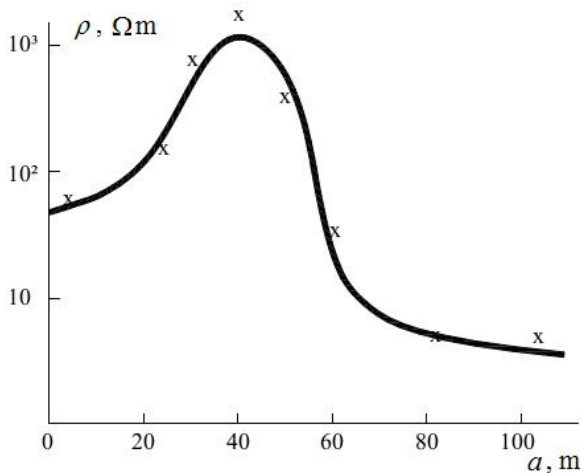
Wartość rezystywności gruntu wyznacza się z zależności

$$(1) \quad \rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4l^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + l^2}}}$$

gdzie: R - rezystancja wyznaczona z zależności $R = U_{N1N2} / I_{P1P2}$, a - rozstaw między elektrodami, l - długość elektrod.

Jeżeli długość elektrod pomiarowych $l \ll a$ to zależność na rezystywność gruntu upraszcza się do postaci $\rho = 2\pi a R$. Jako wynik pomiaru otrzymuje się zastępczą (pozorną) rezystywność gruntu do głębokości równej rozstawowi elektrod a [5]. W pozycji [6] podano, że metodą tą otrzymuje się zastępczą rezystywność gruntu zalegającego na głębokość od $0,7a$ do $0,75a$. W zależności od rodzaju oraz przewidywanego rozmiaru uziemienia można przy wyznaczaniu zastępczej rezystywności gruntu wykonać pomiary dla jednego rozstawu elektrod a równego: $a = \sqrt{S_u} / 20$ - dla uziomu kratowego o powierzchni terenu zajętego przez uziom S_u , $a = 3$ - dla pojedynczego uziomu poziomego, $a = 1,25(t + l)$ - dla uziomu pionowego o długości l i głębokości pograżenia górnego końca t .

W przypadku gruntu jednorodnego, niezależnie od rozstawu elektrod pomiarowych, otrzymuje się rzeczywistą rezystywność gruntu. W warunkach naturalnych rzadko występuje grunt jednorodny, dlatego celem rozpoznania ewentualnego uwarstwienia (zależności rezystywności gruntu od głębokości) należy przeprowadzić serię pomiarów przy różnych rozstawach elektrod pomiarowych. Jest to nazywane sondowaniem geoelektrycznym gruntu i polega na przeprowadzeniu serii pomiarów dla różnych rozstawów elektrod a przy zachowaniu stałej pozycji środka układu pomiarowego. Zestawiając zmierzone wartości rezystywności dla różnych rozstawów sond otrzymamy wykres (Rys. 2) zmienności rezystywności zależny od rozstawu elektrod a .



Rys. 2 Przykładowy przebieg zmienności rezystywności gruntu [7]

Analiza otrzymanego wykresu umożliwi stwierdzenie ewentualnego występowania uwarstwienia gruntu. Na podstawie wykresów zmienności rezystywności przy różnych rozstawach elektrod można „wzrokowo” oszacować uwarstwienie gruntu. Dokładna interpretacja wyników pomiarów wymaga użycia dodatkowo charakterystyk teoretycznych (nomogramów geoelektrycznych) [1] lub specjalizowanych programów komputerowych [4, 8], które pozwalają na dosyć dokładne oszacowania wielowarstwowych modeli gruntu. Jest to zarazem najtrudniejsza część procesu pomiarowego i identyfikacji struktury gruntu. Dla zastosowań w energetyce, jako wystarczająco dokładny uważany jest dwuwarstwowy model gruntu i w wielu przypadkach nie używa się zaawansowanych technik obliczeniowych w procesie wyznaczania jego parametrów [1].

W badaniach zmienności rezystywności gruntu wraz z głębokością, należy uwzględnić nie tylko zmiany powodowane rodzajem gruntu zalegającego na danej głębokości, ale także wpływ czynników zewnętrznych. Czynniki powodującymi zmiany rezystywności gruntu są: temperatura, wilgotność, zawartość soli czy gęstość. W ciągu roku kalendarzowego mogą wystąpić znaczne zmiany rezystywności gruntu powodowane zmiennością temperatury zewnętrznej i wilgotności. Czynniki te oddziałują głównie na górne warstwy gruntu, czyli do stref przemarzania gruntu i przesiąkliwości gleby. Analiza zmienności rezystywności, ale także przenikalności dielektrycznej gruntu ma duże znaczenie podczas wyznaczania parametrów elektrycznych przewodów (tzw. obwodu ziemnopowrotnego) zarówno podziemnych tworzących układ uziomowy jak i podczas wyznaczania parametrów elektrycznych linii napowietrznych, głównie w warunkach wymuszeń udarowych.

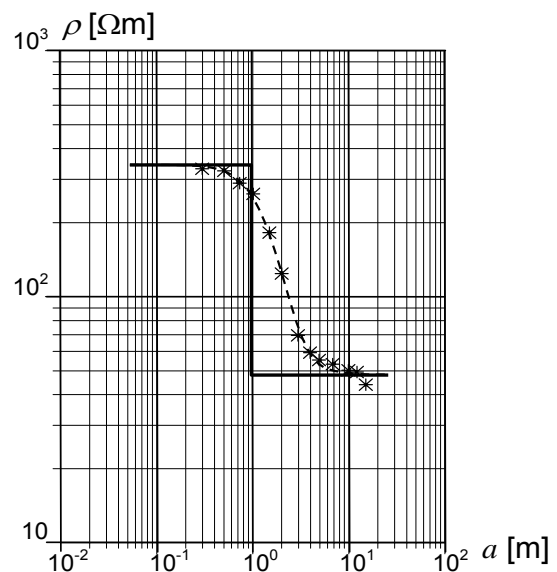
Pomiary rezystywności gruntu

W ramach badań rezystywności gruntu i własności uziomów przeprowadzono na terenie poligonu badawczego Politechniki Rzeszowskiej w miejscowości Huta Poręby, pomiary rezystywności gruntu metodą Wenner'a, z użyciem miernika MRU-101 firmy Sonel. Przykładowe wyniki pomiarów (zgodnie z opisem na rysunku 1) zamieszczone są w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów rezystywności gruntu

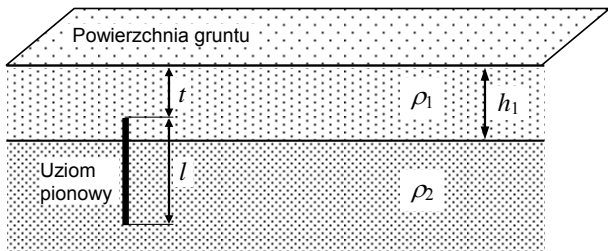
Lp.	a [m]	ρ [Ω m]	l [m]
1	0,3	330	0,1
2	0,5	327	0,1
3	0,7	292	0,1
4	1	264	0,1
5	1,5	183	0,1
6	2	125	0,2
7	3	69,4	0,3
8	4	59,4	0,3
9	5	55,1	0,3
10	7	53,5	0,3
11	10	49,9	0,5
12	12	49,5	0,5
13	15	43,9	0,5

Wykonując serię pomiarów rezystywności dla różnych rozstawów elektrod a i wprowadzając otrzymane wyniki do programu RESAP [8], będącego częścią (modułem) pakietu CDEGS [4] można wyznaczyć strukturę uwarstwienia gruntu: ilość warstw, ich rezystywności i grubości oraz głębokości zalegania. Na rysunku 3 pokazano wykresy zależności rezystywności badanego gruntu od rozstawu elektrod pomiarowych, dla danych zestawionych w tabeli 1.



Rys. 3 Graficzna wizualizacja pomiarów i wyników analizy uwarstwienia gruntu w programie RESAP

Gwiazdkami oznaczone są wyniki pomiarów, linią przerywaną aproksymowana rezystywność zastępcza gruntu, wyznaczona przez program przy założeniu budowy dwuwarstwowej natomiast linią ciągłą pokazany jest proponowany model gruntu składającego się z dwóch warstw jak na rysunku 4. W generowanym przez program RESAP raporcie z obliczeń wyznaczony został model gruntu o następujących parametrach: górna warstwa o rezystywności $\rho_1=343 \Omega$ m i grubości $h_1=0,97$ m, dolna warstwa o rezystywności $\rho_2=48 \Omega$ m.



Rys. 4 Uziom pionowy w gruncie o budowie dwuwarstwowej poziomej

Obliczenia rezystancji uziemień w gruncie niejednorodnym

Najczęściej w analitycznych obliczeniach rezystancji uziemień uwzględniana jest niejednorodność gruntu w postaci poziomego uwarstwienia. W praktyce inżynierskiej ze względu na trudności obliczeniowe poprzestaje się na modelu dwuwarstwowym (Rys. 4). Wyznacza się wtedy zastępczą rezystywność gruntu jednorodnego ρ_z która jest wtedy definiowana jako rezystywność takiego gruntu jednorodnego, w którym rezystancja uziomu jest taka sama jak uziomu w rzeczywistym (warstwowym) gruncie [1]. W obliczeniach rezystancji uziemienia wykorzystuje się wtedy zależności analityczne jak dla gruntu jednorodnego. Rezystywność zastępczą wyznacza się z zależności

$$(2) \quad \rho_z = p \cdot \rho_2$$

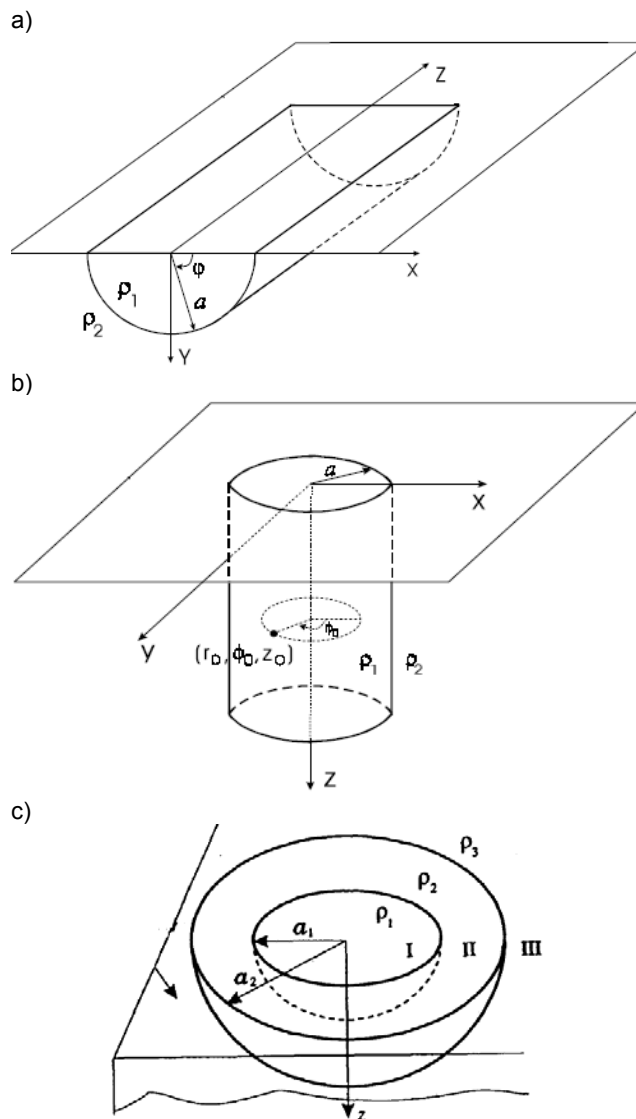
gdzie wartość współczynnika p odczytuje się ze specjalnych wykresów opracowanych na podstawie tak zwanego współczynnika niejednorodności gruntu (3) oraz ilorazów t/l i h_1/h_1 [1].

$$(3) \quad K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_1 + \rho_2)$$

Przykładowo dla uziomu pionowego (jak na rysunku 4) o długości $l=3\text{m}$, przy wartościach rezystywności $\rho_1 = 50 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 500 \Omega\text{m}$ oraz $h_1 = 1 \text{ m}$ i $t = 0,6 \text{ m}$, otrzymuje się wartość rezystywności zastępczej $\rho_z = 250 \Omega\text{m}$. Rezystancja statyczna uziomu wynosi wtedy $R_{st} = 70 \Omega$ [1]. Przy dokładnych obliczeniach z wykorzystaniem dwuwarstwowego modelu gruntu w pakiecie CDEGS, otrzymujemy wartość rezystancji $R_{st} = 59 \Omega$. Wartość rezystancji otrzymana z wykorzystaniem rezystywności zastępczej jest blisko 16% większa. Potwierdza to stwierdzenie z praktyki inżynierskiej, że wyniki otrzymywane metodami uproszczonymi odbiegają od rzeczywistych wartości i zwykle otrzymuje się zawyżone wartości. Jest to uważane za pożądane zjawisko głównie ze względu na ochrony przeciwporażeniową, w której uziemienia odgrywają znaczącą rolę. Obecnie, podejście takie nie jest jednak do końca uzasadnione ze względów ekonomicznych gdyż prowadzi często do zbytniego przewymiarowania układów uziomowych a tym samym zwiększania nakładów finansowych na ich budowę. Z drugiej strony przewymiarowanie uziemień może być korzystne ze względu na wzrost rezystywności gruntu wraz ze zmianami pogodowymi (zmiany temperatury i wilgotności), dając pewien margines bezpieczeństwa.

Kolejnymi rodzajami niejednorodności gruntu, uwzględnianymi w obliczeniach są niejednorodności w postaci cylindrycznej i kulistej jak na rysunku 5. Są one zaimplementowane w pakiecie CDEGS i mogą być wykorzystywane do obliczeń własności uziemień w sąsiedztwie cieków lub zbiorników wodnych takich jak rzeki, jeziora, stawy, morza czy studnie [9, 10]. W przypadku konieczności budowy uziemienia (na przykład stacji

elektroenergetycznej) na obszarze o dużej rezystywności gruntu, możliwe jest także wykorzystanie takich obszarów (o niskiej rezystywności), do budowania zewnętrznych uziomów celem osiągnięcia odpowiednio małej rezystancji wypadkowej uziemienia. Zewnętrzny uziom wykonuje w pobliżu zbiornika wodnego lub częściowo może on być pogrążony w wodzie [9, 10]. Należy wtedy zadbać o ograniczenie dostępu do obszarów objętych takim uziemieniem osób postronnych lub zwierząt, ze względu na możliwość wnoszenia potencjału poza teren stacji elektroenergetycznej a tym samym zagrożenie napięciem dotykowym lub krokowym [1].

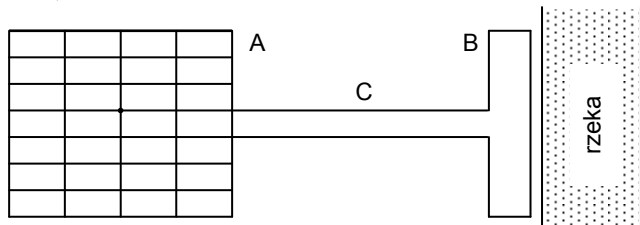


Rys. 5 Modele niejednorodności gruntu: a) poziomy pół-cylindryczny, b) pionowy cylindryczny, c) pół-kulisty

Występowanie niejednorodności gruntu w postaci pionowego cylindra (Rys. 5b), dotyczy wykorzystania zbrojenia fundamentów słupów jako elementów uziemienia oraz wykorzystywania specjalnych materiałów o niskiej rezystywności, do tworzenia otuliny zwiększającej wymiary poprzeczne prętów pionowych. Analityczna zależność na rezystancję uziemienia w postaci pionowego pręta o długości l , i średnicy d , otulonego na całej swojej długości materiałem o rezystywności ρ_{cyl} , średnicy D , zakopanego w gruncie o rezystywności ρ_{nat} dana jest zależnością [11, 12]

$$(4) \quad R = \frac{1}{2\pi l} (\rho_{cyl} \ln(D/d) + \rho_{nat} [\ln(8l/D) - 1])$$

Modelowanie własności uziemienia w gruncie niejednorodnym, w postaci sąsiadującego ciek wodnego zostało pokazano na przykładzie w którym do uziemienia robocznego dołączony jest układ uziomowy zewnętrzny. Na rysunku 6 przedstawiony jest uziom kratowy o rozmiarze 40x35 m, połączony dwoma przewodami o długości 100 m z otokowym uziomem zewnętrznym o wymiarach 10x35 m i położonym w sąsiedztwie rzeki o szerokości 50m. Wszystkie przewody uziemienia zakopane są na głębokości $t = 0,7m$.



Rys. 6 Szkic analizowanego układu: A - uziom kratowy, B - otokowy uziom zewnętrzny, C – przewody łączące uziom kratowy z uziomem zewnętrznym

Celem zbadania wpływu położenia uziomu zewnętrznego względem rzeki (zamodelowanej obszarem półcylindrycznym jak na rysunku 5a) na wartość rezystancji wypadkowej układu, rozpatrzono jego usytuowanie w różnych odległościach od rzeki: Przeprowadzono obliczenia w pakiecie CDEGS dla 3 położenia otoku: w odległości 5 m, odległości 1m oraz dla przypadku zanurzenia otoku w rzece. Obliczono także rezystancję samej kraty oraz kraty z uziemieniem zewnętrznym bez sąsiedztwa rzeki. Przyjęto wartość rezystywności gruntu $\rho_1 = 500 \Omega m$ i rezystywności wody $\rho_2 = 20 \Omega m$ (wg oznaczeń na rysunku 5a). Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki obliczeń rezystancji uziemienia kratowego z uziomem zewnętrznym

Lp.	Układ	R [Ω]
1	Bez rzeki - sama krata	6,11
2	Bez rzeki - cały układ	4,44
3	Z rzeką - sama krata	6,10
4	Z rzeką - cały układ (odl. 5 m od rzeki)	4,13
5	Z rzeką - cały układ (odl. 1 m od rzeki)	3,82
	Z rzeką - cały układ (otok w rzece)	1,52

Z obliczeń widać duży wpływ uziomu zewnętrznego na wartość rezystancji wypadkowej, co jest oczywiste ze względu na sam fakt powiększenia rozmiarów uziemienia. Największe obniżenie rezystancji uzyskuje się dla przypadku zanurzenia otoku w rzece. Rezystancja takiego układu jest 4-o krotnie mniejsza niż dla samej kratownicy w gruncie jednorodnym (bez sąsiedztwa rzeki). W rzeczywistych warunkach, układy w których występuje zbliżenie układu zewnętrznego do rzeki, mogą dawać niższą wartość rezystancji, ze względu zmniejszenie rezystywności gruntu, który w sąsiedztwie rzeki jest nasiąknięty wodą.

Jak zostało wspomniane wcześniej, przyłączanie takich zewnętrznych układów uziomowych, ze względu na dodatkowe koszty ich budowy, musi być podyktowane wymogami co do uzyskania odpowiednio małej rezystancji uziomu. Na pewno warto rozważyć taką koncepcję, gdy nie ma innych technicznych możliwości uzyskania odpowiednio małych rezystancji uziomu (na przykład przez dołączenie uziomów pionowych).

Wnioski

W badaniu własności układów uziomowych szczególne znaczenie ma prawidłowe rozpoznanie budowy geoelektrycznej gruntu. Można wtedy w sposób bardziej dokładny zaprojektować układ uziomowy który spełni wymagania techniczne co do odpowiednio małej wartości rezystancji uziemienia czy też odpowiedniego rozkładu napięć rażeniowych (krokowych i dotykowych) na powierzchni ziemi.

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z modelowaniem układów uziomowych w gruncie o niejednorodnej budowie. Przedstawione możliwości pakietu komputerowego CDEGS pokazują jego dużą przydatność zarówno na etapie rozpoznawania struktury gruntu jak i do obliczania wartości rezystancji układów uziomowych o dowolnej budowie i przy różnego rodzaju niejednorodnościach gruntu. Zaimplementowane w pakiecie modele niejednorodności gruntu reprezentują szerokie spektrum spotykanych w praktyce inżynierskiej przypadków niejednorodności, zarówno występujące w sposób naturalny (uwarstwienia i uskoki gruntu, ciek i akwenty wodne), jak i sztuczne, wytworzone przez człowieka (studnie, fundamenty obiektów).

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.

LITERATURA

- [1] Wołkowiński K., Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych, WNT Warszawa 1967
- [2] Flisowski Zd., Technika wysokich napięć, WNT Warszawa 2009
- [3] Menter F., EMTF Based Model for Grounding System Analysis *IEEE Trans on PWRD*, Vol.9, no.4, October 1994
- [4] CDEGS Software Package, 2012, Safe Engineering Services & technologies Ltd., Laval, Quebec, Canada, Version 14, June 2012
- [5] Wenner F., A Method of Measuring Earth Resistivity; Bull, National Bureau of Standards, Bull 12(4) 258, p. 478-496; 1915/16
- [6] Jabłoński W., Zapobieganie porażeniom elektrycznym w urządzeniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia, WNT Warszawa 1992
- [7] ANSI/IEEE Std 81-2012 IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System
- [8] RESAP USER'S MANUAL, Safe Engineering Services & technologies Ltd, Montreal, Canada 2002
- [9] Yang Y., Ma J., Dawalibi F. P., The Effects of Low Resistivity Cylindrically Shaped Soil Volumes on Grounding Systems, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering (ICEE'2001), Xian, China, July 22-26, 2001.
- [10] Ma J., Dawalibi F. P., K. Daily W., Analysis of Grounding Systems in Soils with Hemispherical Layering, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 4, October 1993, pp. 1773-1781
- [11] FAGAN E. J., LEE R. H., The Use of Concrete-Enclosed Reinforcing Rods as Grounding Electrodes, *IEEE Trans. on Industry and General Application*, Vol. IGA-6, no. 4, July/August 1970
- [12] Ma J., Dawalibi F. P., Analysis of Grounding Systems in Soil with Finite Volumes of Different Resistivities *IEEE/PES Trans. on PWRD*, Vol. 17, No. 2, April 2002, pp. 596-602.

Autor: dr inż. Robert Ziemba, Politechnika Rzeszowska, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: ziemba@prz.edu.pl