

## Badania modelowe właściwości statycznych i udarowych uziomu słupa elektroenergetycznego przy różnych gruntach

**Streszczenie.** W pracy przeanalizowano właściwości statyczne i udarowe uziomu słupa elektroenergetycznego przy różnych parametrach gruntu, z uwzględnieniem charakterystyk częstotliwościowych, parametrów udarowych oraz zjawisk nieliniowych związanych z jonizacją w gruncie, zachodzącą przy rozpraszaniu prądów udarowych o dużym natężeniu. Analizy dokonano w oparciu o wyniki obliczeń numerycznych bazujących na teorii pola elektromagnetycznego i metodzie momentów oraz zaczerpnięty z literatury model analityczny opisujący zjawiska wielkopiędowe.

**Abstract.** The static and surge properties of the pole grounding system at various soil parameters has been analyzed, taking into account the frequency characteristics, surge parameters, and nonlinear phenomena related to soil ionization during the dissipation of high-intensity surge currents. The analysis is based on the results of numerical calculations that use electromagnetic field theory and method of moments, and known analytical model of high-current phenomena. (**Modeling of static and surge properties of the power system pole grounding for various soils**).

**Słowa kluczowe:** uziom słupowy, uziemienie odgromowe, właściwości statyczne i udarowe uziomu, analiza numeryczna.

**Keywords:** pole grounding system, lightning grounding, static and surge properties of grounding, numerical analysis.

### Wstęp

Uziemienie elektroenergetyczne, ze względu na funkcje robocze i ochronne, powinno zapewnić wspólny potencjał odniesienia, możliwość odprowadzania prądów o dużych natężeniach oraz ograniczenie napięć rażeniowych do wartości bezpiecznych. Wymaga to uzyskania odpowiednio niskiej impedancji dla prądu stałego lub przemiennego małej częstotliwości, tj. rezystancji statycznej  $R_{st}$ :

$$(1) \quad R_{st} = V/I$$

gdzie:  $I$ ,  $V$  – amplitudy prądu odprowadzanego przez uziom i potencjału uziomu, przy częstotliwości roboczej.

Podczas rozpraszania prądu piorunowego przez uziom dochodzi do chwilowego wzrostu potencjału, który przenosząc się na przewody odgromowe może prowadzić do rozwoju tzw. przeskoków odwrotnych na izolatorach. Eliminacja tego zagrożenia wymaga uzyskania odpowiednio niskiej umownej impedancji udarowej uziemienia  $Z_u$ :

$$(2) \quad Z_u = V_u / I_u$$

gdzie:  $I_u$ ,  $V_u$  – wartości szczytowe prądu rozpraszanego przez uziom i potencjału w miejscu wpłynięcia prądu.

Właściwości uziomu zależą głównie od rezystywności gruntu oraz rozmiarów i konfiguracji uziomu. Podczas rozpraszania prądu udarowego uziemienie wykazuje zwykle właściwości znacznie różniące się od obserwowanych w warunkach statycznych. Mają na to wpływ zjawiska wielko-częstotliwościowe oraz wielkopiędowe [1]-[3].

Zjawiska wielko-częstotliwościowe związane są z dużą szybkością zmian prądu rozpraszanego przez uziom. W efekcie w przebiegu potencjału pojawiają się składowe wynikające z indukcyjności wzdłużnej elementów uziomu, sprzężeń elektromagnetycznych pomiędzy elementami uziomu oraz skończonej prędkości rozchodzenia się fali. Zjawiska te powodują pogorszenie właściwości udarowych uziomu w porównaniu do charakterystyk statycznych.

Zjawiska wielkopiędowe związane są z dużą gęstością prądu i dużym gradientem potencjału w otoczeniu uziomu. Jeśli przekroczona zostanie krytyczna wartość natężenia pola elektrycznego dochodzi do jonizacji i rozwoju wyładowań elektrycznych w gruncie. Zjawisko to prowadzi do poprawy właściwości udarowych uziomu [1]-[3].

Właściwości uziemień w zakresie rozpraszania prądów piorunowych były i są przedmiotem analiz teoretycznych i

symulacyjnych oraz badań eksperymentalnych [1]-[13]. Proponowane metody i modele nie uwzględniają jeszcze w pełni wszystkich zachodzących zjawisk a ich poprawność nie do końca można zweryfikować eksperymentalnie. Badania zwykle ograniczają się do pojedynczych uziomów pionowych, poziomych lub otokowych [7], [9], [12]. Ponadto brak jest wyników analiz, które mogłyby stanowić pomoc dla służb energetyki w procesie projektowania uziemień.

W artykule szczegółowo przeanalizowano właściwości statyczne i udarowe uziomu słupa elektroenergetycznego. Rozważano wpływ parametrów gruntu i kształtu fali prądu pioruna na impedancję zespoloną, przebieg potencjału oraz umowną impedancję udarową. Analizy dokonano w oparciu o obliczenia numeryczne, prowadzone metodą bazującą na teorii pola elektromagnetycznego [14], oraz prosty model analityczny opisujący zjawiska wielkopiędowe [11].

### Metody analizy właściwości udarowych uziemień

Procesy przejściowe zachodzące podczas rozpraszania w ziemi prądu piorunowego, przy pominięciu nieliniowych zjawisk wielkopiędowych, można efektywnie analizować za pomocą symulacji komputerowych wykorzystujących istniejące modele i metody numeryczne. Stosowane są proste quasi-statyczne modele obwodowe [4], modele linii transmisyjnej [5] oraz zaawansowane modele teorii pola elektromagnetycznego [6]. Metody polowe w szczególności umożliwiają analizę rozbudowanych systemów uziomowych z uwzględnieniem wielu czynników, takich jak kształt fali prądu udarowego, parametry elektryczne gruntu i ich zależność od częstotliwości [6].

Zjawiska wielkopiędowe uwzględnia się w sposób uproszczony. Generalnie stosowane są dwie metody. Pierwsza z nich, implementowana przede wszystkim do modeli obwodowych i linii transmisyjnej oraz prostych uziomów [7]-[9], polega na zastąpieniu uziomu o danym promieniu  $r$  uziomem o promieniu ekwiwalentnym  $r_x > r$ , który reprezentuje strefę jonizacji w gruncie:

$$(3) \quad r_x = \frac{\rho \cdot I_m}{2\pi \cdot l \cdot E_c}$$

gdzie:  $\rho$  – rezystywność gruntu,  $l$  – długość uziomu (lub danego elementu uziomu),  $I_m$  – prąd rozpraszany przez uziom (lub dany element uziomu),  $E_c$  – krytyczna wartość natężenia pola elektrycznego konieczna do wystąpienia jonizacji.

Strefa jonizacji rozciąga się do odległości, przy której natężenie pola zmniejsza się poniżej wartości krytycznej  $E_c$ .

Druga z metod uwzględnienia zjawisk wieloprądowych, rekomendowana przez CIGRE [11], polega na zastąpieniu statycznej rezystancji uziomu  $R_{st}$  nieliniową rezystancją  $R(t)$  będącą funkcją prądu rozpraszanego przez uziom  $i(t)$ :

$$(4) \quad R(t) = \frac{R_{st}}{\sqrt{1 + i(t)/I_g}}, \quad I_g = \frac{\rho \cdot E_c}{2\pi \cdot R_{st}^2}$$

gdzie:  $I_g$  – graniczna wartość prądu rozpraszanego przez uziom, przy której wystąpi jonizacja.

Metodę tę zaimplementowano w prostych modelach obwodowych [12] jak również w modelach opartych na teorii pola elektromagnetycznego [13]. Sposób postępowania w [13] polegał na wydzieleniu z przebiegu potencjału  $v(t)$ , obliczonego przy założeniu braku jonizacji, składowej odpowiadającej rezystancji statycznej  $R_{st} \cdot i(t)$ , a następnie zastąpieniu jej składową rezystancyjną nieliniową  $R(t) \cdot i(t)$ .

Krytyczna wartość natężenia pola elektrycznego  $E_c$  zależy od wielu czynników, głównie od rezystywności gruntu, i można ją wyznaczyć tylko eksperymentalnie. Wartość zalecana do analiz wynosi ok. 300 kV/m [11].

### Metoda obliczeń numerycznych

Obliczenia prowadzono za pomocą programów HIFREQ i FFTSES, będących częścią specjalistycznego pakietu CDEGS [14]. Program HIFREQ umożliwia przestrzenną i czasową analizę efektów linowych zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w strukturach, które można uważać za cienko-przewodowe, umieszczonych w wielowarstwowym ośrodku (powietrze, grunt). Metodologia obliczeń oparta jest na teorii pola elektromagnetycznego i metodzie momentów w dziedzinie częstotliwości. Program umożliwia określenie geometrii i parametrów elektrycznych struktury cienko-przewodowej oraz układu i parametrów elektrycznych ośrodka, w którym ta struktura się znajduje.

Program FFTSES pozwala na dokonanie transformacji pomiędzy dziedzinami czasu i częstotliwości.

### Przebiegi składowych krótkotrwałych prądu pioruna

Do analiz przyjęto reprezentatywne składowe krótkotrwałe prądu piorunowego zdefiniowane w normie PN-EN 62305-1 [15], tj. udary: pierwszy dodatni 10/350  $\mu$ s, pierwszy ujemny 1/200  $\mu$ s i następny ujemny 0,25/100  $\mu$ s. Dodatkowo, wprowadzono udar o kształcie 4/200  $\mu$ s. Do opisu przebiegu prądów udarowych przyjęto zależność [15]:

$$(5) \quad i(t) = \frac{I_u}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_1)^{10}} \cdot e^{-t/\tau_2}$$

gdzie:  $I_u$  – wartość szczytowa prądu,  $\eta$  – współczynnik korekcyjny wartości szczytowej,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – stałe czasowe odpowiednio czoła i grzbietu udaru.

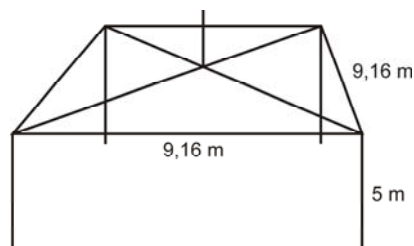
Wartości parametrów występujących w (5), pozwalające na uzyskanie żądanych prądów zestawiono w tabeli 1.

### Układ uziemienia słupa i parametry gruntu

Uproszczoną strukturę reprezentującą uziemienie słupa w programie HIFREQ (przy pominięciu nieliniowych zjawisk wieloprądowych) pokazano na rysunku 1. Układ składa się z otoku zakopanego na głębokości 0,8 m, uziomów pionowych oraz przewodów łączących otok ze strukturą nadziemną. Elementy uziomu reprezentowano za pomocą miedzianych cylindrycznych przewodów o promieniu 14,3 mm (otok i przewody łączące, jako ekwiwalent taśmy miedzianej) oraz 12,5 mm (uziomy pionowe).

Tabela 1. Parametry prądów piorunowych, zgodnie z (5)

Kształt	Poziom	$I_u$ (kA)	$\eta$ (-)	$\tau_1$ ( $\mu$ s)	$\tau_2$ ( $\mu$ s)
10/350 $\mu$ s [15]	I	200	0,93	19	485
	II	150			
	III-IV	100			
4/200 $\mu$ s	I	150	0,95	7,55	277
	II	100			
	III-IV	75			
1/200 $\mu$ s [15]	I	100	0,986	1,82	285
	II	75			
	III-IV	50			
0,25/100 $\mu$ s [15]	I	50	0,993	0,454	143
	II	37,5			
	III-IV	25			



Rys.1. Struktura reprezentująca uziemienie słupa w HIFREQ

Zgodnie z wymaganiami metody numerycznej, elementy uziomu podzielono na segmenty o długości minimalnej 10 cm (odpowiadającej najwyższej częstotliwości i najniższej rezystywności gruntu). W obliczeniach założono jednorodną strukturę gruntu, którego parametry elektryczne zmieniano zgodnie ze schematem podanym w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry gruntu, dla których prowadzono obliczenia

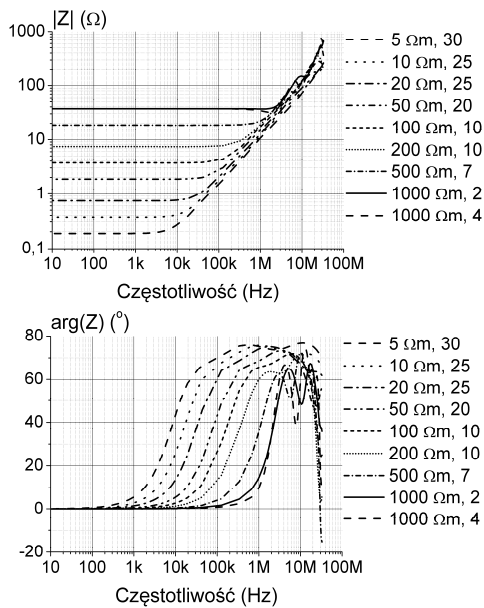
Rezystywność $\rho$ ( $\Omega$ m)	Przenikalność elektryczna wzgl. $\epsilon_r$ (-)	Uwagi
5	30	Gleba żyzna, bardzo wilgotna
10	25	
20	25	
50	20	Gleba żyzna, wilgotna
80	20	
100	10	Gleba średnia-żyzna, wilgotna
200	10	Gleba średnia, wilgotna
300	8	
400	8	
500	7	Gleba uboga, sucha
600	6	
700	5	
800	4	
900	3	
1000	2	Duże miasta, lasy
1000	4	

### Efekty zjawisk wielko-częstotliwościowych

W pierwszym etapie analizy przeprowadzono obliczenia za pomocą programu HIFREQ dla układu z rys. 1, tj. przy pominięciu nieliniowych zjawisk wieloprądowych. Wyniki obliczeń zespolonej impedancji uziomu dla prądu przemiennego o amplitudzie 1 A pokazano na rysunku 2.

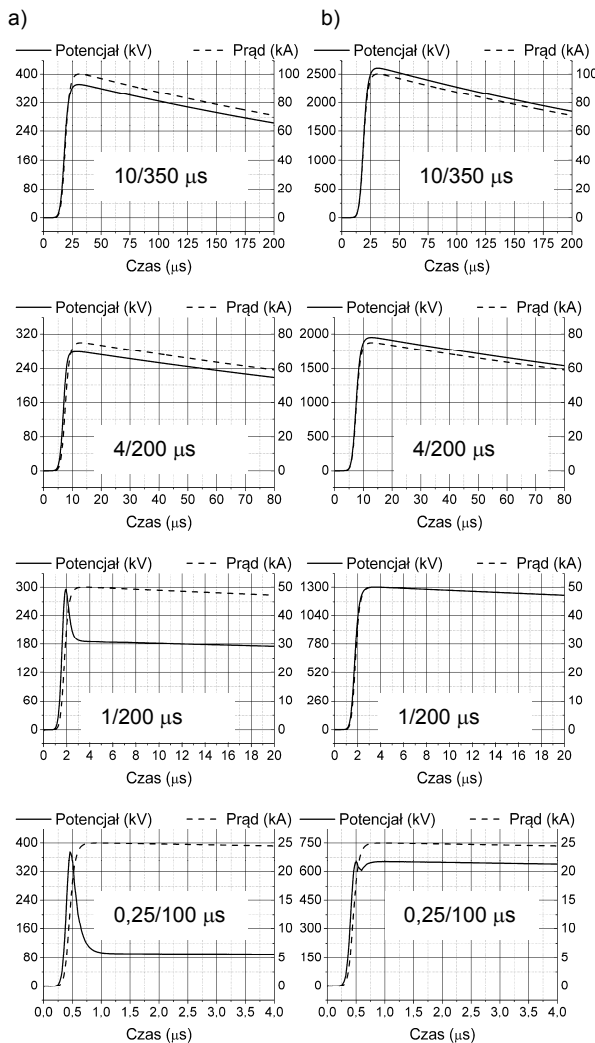
W zakresie niskich częstotliwości (faza bliska 0) można wyznaczyć rezystancję statyczną  $R_{st}$  uziomu. Zakres ten jest tym szerszy im wyższa jest rezystywność gruntu, co wiąże się z większą długością fali rozchodzącej się w gruncie o wyższej rezystywności. W tym zakresie cały uziom uczestniczy w rozpraszaniu prądu, tj. powierzchnia efektywna uziomu jest równa lub większa od rzeczywistej.

W zakresie wyższych częstotliwości impedancja przybiera charakter indukcyjny (wzrost fazy do ok. 80°), a przy częstotliwości kilku-kilkudziesięciu megaherców widoczne są rezonanse związane ze zjawiskami falowymi.



Rys.2. Zespolona impedancja uziomu dla różnych gruntów

Przebiegi prądów piorunowych i potencjałów względem ziemi odniesienia dla wybranych parametrów gruntu przy pominięciu zjawiska jonizacji przedstawiono na rysunku 3.

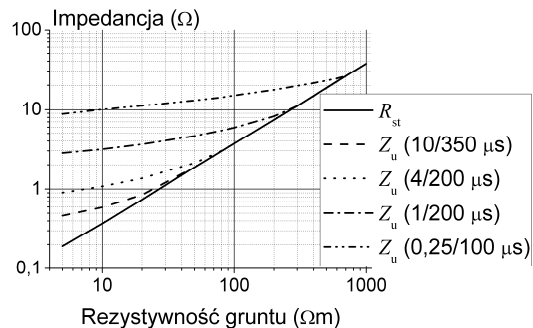


Rys.3. Prądy piorunowe i potencjały w miejscu wpływania prądów do uziomu przy: a)  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_r = 10$ ; b)  $\rho = 700 \Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_r = 5$

W przypadku wolno narastających prądów udarowych (10/350 i 4/200), szczególnie przy wyższych wartościach rezystywności gruntu, w przebiegu potencjału dominuje składowa rezystancyjna. Kształty napięcia i prądu są do siebie zbliżone i osiągają wartości szczytowe w przybliżeniu tej samej chwili czasu.

W przypadku prądów o krótkim czasie narastania czoła (1/200 i 0,25/100), w przebiegu potencjału obok składowej rezystancyjnej zauważalna jest składowa szybkozmienna na czole. Przebieg potencjału znacząco różni się od przebiegu prądu pioruna, w szczególności osiąga wartość szczytową wyraźnie wcześniej niż przebieg prądu. W tym przypadku zaznaczają się właściwości dynamiczne uziomu, które sprawiają, że jego powierzchnia efektywna jest mniejsza niż rzeczywista. Przy wzroście rezystywności gruntu udział składowej szybkozmiennnej maleje. Przy rezystywności 1000  $\Omega\text{m}$  dla wszystkich kształtów prądów pioruna praktycznie dominuje składowa rezystancyjna.

Porównanie umownej impedancji udarowej i rezystancji statycznej uziemienia pozwala na ilościową ocenę zjawisk. Na rysunku 4 przedstawiono zależność rezystancji statycznej i impedancji udarowej od rezystywności gruntu.



Rys.4. Zależność umownej impedancji udarowej i rezystancji statycznej uziomu od rezystywności gruntu

Krzywe umownej impedancji udarowej i rezystancji statycznej różnią się znacząco w zakresie niskich rezystywności gruntu. Największe wartości ilorazu  $Z_u/R_{st}$  (przy rezystywności 5  $\Omega\text{m}$ ) wyniosły ok.: 2,4 (udar 10/350), 4,8 (udar 4/200), 14,8 (udar 1/200) i 46,5 (udar 0,25/100).

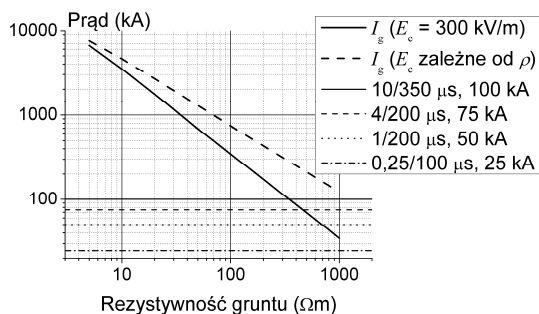
Z rysunku wynika, że uziemienie ma dominujący charakter rezystancyjny przy rezystywności gruntu powyżej:

- dla udaru 10/350 – ok. 50  $\Omega\text{m}$  ( $Z_u \approx R_{st} \approx 1,9 \Omega$ );
- dla udaru 4/200 – ok. 90  $\Omega\text{m}$  ( $Z_u \approx R_{st} \approx 3,5 \Omega$ );
- dla udaru 1/200 – ok. 300  $\Omega\text{m}$  ( $Z_u \approx R_{st} \approx 11 \Omega$ );
- dla udaru 0,25/100 – ok. 700  $\Omega\text{m}$  ( $Z_u \approx R_{st} \approx 26 \Omega$ ).

### Efekty zjawisk wielkopądowych

W celu oceny możliwości wystąpienia jonizacji w gruncie oraz spodziewanego efektu obniżenia impedancji udarowej uziomu, wyznaczono zależność prądu granicznego  $I_g$  od rezystywności gruntu, zgodnie z (4). Rysunek 5 przedstawia dwie zależności na prąd graniczny wyznaczone przy założeniu, że wartość krytyczna natężenia pola elektrycznego  $E_c$ : 1) jest równa 300 kV/m (linia ciągła); 2) zależy od rezystywności gruntu zgodnie z zależnością opracowaną przez Oettle i cytowaną w [9] (przerwana).

Warunkiem wystąpienia zjawisk wielkopądowych jest osiągnięcie przez prąd rozpraszany przez uziom wartości co najmniej równej wartości granicznej  $I_g$ . Zatem krzywa na prąd graniczny oznaczona linią ciągłą przedstawia bardziej korzystny przypadek, w którym jonizacja wystąpi przy najniższych wartościach rezystywności gruntu a możliwy efekt obniżenia impedancji udarowej będzie największy. Krzywą tą przyjęto do dalszych rozważań.



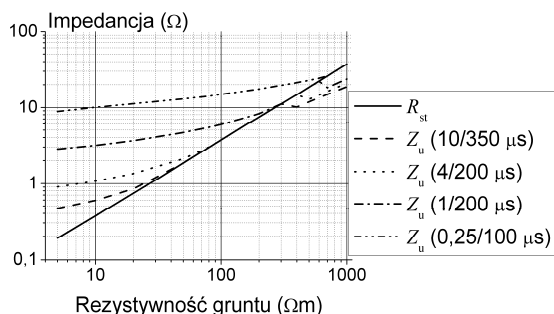
Rys.5. Zależność prądu granicznego  $I_g$  koniecznego do wystąpienia jonizacji od rezystywności gruntu, wg (4)

Największe obniżenie impedancji uziomu będzie miało miejsce w przypadku wystąpienia prądów piorunowych o największych spodziewanych wartościach (tab. 1 poziom I). W pierwszym przybliżeniu można założyć, że do uziomu słupa wpłynie połowa spodziewanego prądu pioruna [15] (rys. 5), pozostała część będzie rozpraszana przez uziomy słupów sąsiednich. W takim przypadku jonizacja będzie możliwa (rys. 5) przy rezystywności gruntu (rezystancji statycznej uziomu) równej lub większej od ok.:

- 345  $\Omega m$  ( $Z_u \approx R_{st} \approx 12,8 \Omega$ ) dla udaru 10/350;
- 465  $\Omega m$  ( $Z_u \approx R_{st} \approx 17 \Omega$ ) dla udaru 4/200;
- 705  $\Omega m$  ( $Z_u \approx R_{st} \approx 25,9 \Omega$ ) dla udaru 1/200;
- $>> 1000 \Omega m$  ( $Z_u \approx R_{st} \approx 37,2 \Omega$ ) dla udaru 0,25/100.

Uwzględniając zależności przedstawione na rysunku 4, dla każdego z prądów piorunowych jonizacja wystąpi w zakresie, w którym uziemienie ma charakter rezystancyjny ( $Z_u \approx R_{st}$ ). Ponieważ określone wyżej wartości rezystywności są najniższymi wartościami, przy których jonizacja jest możliwa, również w przypadku wystąpienia prądów pioruna o mniejszych wartościach szczytowych jonizacja wystąpi w zakresie, w którym  $Z_u \approx R_{st}$ . Zatem szacując możliwy efekt obniżenia impedancji udarowej można wprost zastosować wzór (4). Wyznaczone krzywe impedancji udarowej uziomu przy rozpraszaniu prądów pioruna o największych spodziewanych wartościach przedstawiono na rysunku 6.

Przy rezystywności gruntu 1000  $\Omega m$  uzyskuje się obniżenie impedancji udarowej z wartości 37  $\Omega$  do ok. 19  $\Omega$  (udar 10/350), 21  $\Omega$  (udar 4/200), 24  $\Omega$  (udar 1/200).



Rys.6. Zależność impedancji udarowej od rezystywności gruntu przy uwzględnieniu jonizacji przy rozpraszaniu przez uziom prądów piorunowych o największych spodziewanych wartościach (rys 5)

## Podsumowanie

Rozważane uziemienie umożliwia uzyskanie rezystancji statycznej poniżej 10  $\Omega$  w gruntach o rezystywności do ok. 200  $\Omega m$ . W gruntach o niskiej rezystywności (5-50  $\Omega m$ ) częstotliwość, przy której można wyznaczyć rezystancję statyczną nie powinna przekraczać 100 Hz.

W gruntach o niskiej rezystywności impedancje udarowe wyznaczone dla różnych kształtów fali prądu pioruna oraz rezystancja statyczna uziomu znacznie się od siebie różnią.

Ze wzrostem rezystywności gruntu krzywe impedancji udarowej zbiegają się do rezystancji statycznej.

W analizowanym zakresie parametrów gruntu właściwości udarowe uziemienia determinowane są głównie efektami zjawisk wielko-częstotliwościowych. Zjawiska wieloprądowe mają znaczenie marginalne. Jedynie w przypadku wystąpienia prądów piorunowych o największych spodziewanych wartościach i o małej szybkości narastania oraz przy wyższych wartościach rezystywności gruntu można liczyć na znaczne obniżenie impedancji udarowej.

*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/W/E/1/2015 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.*

**Autorzy:** dr hab. inż. Renata Markowska, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: [r.markowska@pb.edu.pl](mailto:r.markowska@pb.edu.pl).

## LITERATURA

- [1] Łoboda M., Udarowe właściwości uziemień ochrony odgromowej obiektów budowlanych i elektroenergetycznych, *Oficyna Wydawnicza PW*, Warszawa 2003
- [2] Visacro S., A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22 (2007), n.1, 381-386
- [3] Visacro S., Response of grounding electrodes to impulsive currents: An experimental evaluation, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51 (2009), n.1, 161-164
- [4] Celli G., Ghiani E., Pilo F., Behaviour of grounding systems: A quasi-static EMTP model and its validation, In Proc. 30th International Conference on Lightning Protection – ICLP 2010, Cagliari, Italy, September 13-17 (2010), 1335-1-1335-6
- [5] Lima A.B., Paulino J.O.S., Boaventura W.C., Caetano C.E.F., Cardoso E.N., Transmission line grounding arrangement that overcomes the effective length issue, In Proc. 33rd International Conference on Lightning Protection – ICLP 2016, Estoril, Portugal, September 25-30 (2016)
- [6] Akbari M., Sheshyekani K, Alemi M.R., The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on lightning performance of grounding systems, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 55 (2013), n.4, 739-746
- [7] Loboda M., Transient behavior and parameters of earth electrodes designed for lightning protection system (LPS) in focus of the requirements of new edition of IEC (EN) 62305 standard, In Proc. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, Chengdu, China, November 1-4 (2011), 642-6649
- [8] Djamel I., Slaoui F.H., Georges S., Transient response of grounding systems under impulse lightning currents, In Proc. Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ), Tallin, Estonia, 29-31 October (2016), doi. 10.1109/PQ.2016.7724092
- [9] Chiheb S., Kherif O., Tegar M., Mekhaldi A., Transient behavior of vertical grounding electrode under impulse currents, In Proc. 5th International Conference on Electrical Engineering – Boumerdes (ICEE-B), Boumerdes, Algeria, 29-31 October (2017), doi. 10.1109/ICEE-B.2017.8192075
- [10] Liu Y., Theethayi N., Gonzalez R.M., Thottappillil R., The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results, *IEEE International Symposium on EMC*, Boston, MA, USA, 18-22 August (2003), 794-799, doi. 10.1109/ISEMC.2003.1236709
- [11] CIGRE Working Group 33-01 (Lightning) of Study Committee 33, Overvoltages and insulation coordination, Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, Paris, France, October (1991)
- [12] Mokhtari M., Abdul-Malek Z., Salam Z., An improved circuit-based model of grounding electrode by considering the current rate of rise and soil ionization factors, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30 (2015), n.1, 211-219
- [13] Grcev L., Time- and frequency-dependent lightning surge characteristics of grounding electrodes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24 (2009), n.4, 2186-2196
- [14] CDEGS v. 13 software, HIFREQ and FFTSES modules, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, 2000
- [15] PN-EN 62305-1:2011, Ochrona odgromowa. Część 1: Zasady ogólne