

## OCENA UZIEMIEN ŚLUPÓW LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH ZWŁASZCZA POSADOWIONYCH NA GRUNTACH O WYSOKIEJ REZYSTYWNOCI

Stanisław WOJTAS

Miejsce pracy: Politechnika Gdańska  
tel.: 601328687 e-mail: stanislaw.wojtas@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule została omówiona problematyka pomiaru i oceny właściwości uzemień słupów linii elektroenergetycznych z wykorzystaniem przebiegów wolno- i szybkozmiennych. Uzyskanie odpowiednio niskiej wartości rezystancji uzimienia słupa posadowionego na gruncie o rezystywności powyżej 1000  $\Omega\text{m}$  może być trudne. Praca zawiera analizę zmian właściwości statycznych i udarowych uzemień w funkcji rezystywności otaczającego gruntu oraz amplitudy prądu. Zwrócono uwagę na dużą rolę fundamentów słupa, które mogą w znaczący sposób wpływać na rezystancję wypadkową uzimienia słupa. W podsumowaniu zamieszczono uwagi oraz wskazówki odnośnie konstrukcji i sposobów oceny uzemień pograżonych w gruntach o wysokiej rezystywności.

**Słowa kluczowe:** uzimienia, uzimienia słupów, pomiary uzemień, pomiary uzemień słupów.

### 1. WSTĘP

Systemy uzemień należą do ważnych elementów składowych systemu elektroenergetycznego. Prawidłowy dobór i wykonanie uzemień podnosi stopień bezpieczeństwa ludzi oraz urządzeń, które znajdują się w strefach oddziaływania niebezpiecznych zjawisk. Do takich zdarzeń należy pojawienie się groźnego prądu zwarciovego lub udaru prądowego wywołanego wyladowaniami atmosferycznymi. Wtedy prąd związany z zakłóceniami jest odprowadzany i rozpraszany w ziemi poprzez układ uzimiania. Wobec tego istnieje powszechne wymaganie, aby rezystancja systemu uzimiania była wystarczająco mała i spełniała wymagania znajdujące się w określonych normach i przepisach.

Uzimienia podlegają pomiarom kontrolnym nie tylko podczas procedury odbioru inwestycji, ale także okresowo w trakcie procesu eksploatacji systemu elektroenergetycznego. Okresowe kontrole dotyczą przede wszystkim oceny rezystancji uzemień. Stosowane metody okresowej oceny powinny zapewniać wystarczającą dokładność oraz nie mogą być czasochłonne i zakłócające pracę systemu elektroenergetycznego. Uwagi te są szczególnie ważne w przypadku uzemień związanych ze słupami linii przesyłowych. Okresowa, zwykle odbywająca się co 4 – 5 lat, kontrola uzemień słupów linii jest zadaniem uciążliwym przede wszystkim ze względu na znaczną liczbę słupów w krajowym systemie elektroenergetycznym. Poza tym ocena uzemień słupów, które są połączone równolegle

przewodami odgromowymi następcza dodatkowe wymagania stawiane procedurze pomiarowej..

Zadaniem ochrony odgromowej i przepięciowej jest przede wszystkim redukcja amplitudy fali napięciowej do wymaganej wartości poniżej poziomu podstawowego izolacji systemu. W pracy linii elektroenergetycznych istotnym źródłem zakłóceń są przeskoki odwrotne na izolatorach spowodowane przepływem przez słup do ziemi prądu piorunowego. Impedancja uzemień słupów linii przesyłowych jest elementem, który ma znaczący wpływ na te zjawiska [1].

Celem prezentowanej pracy jest wskazanie możliwych procedur pomiaru i oceny uzemień słupów elektroenergetycznych linii przesyłowych zaopatrzonych w przewody odgromowe. Przedmiotem rozważań jest przede wszystkim analiza właściwości uzimienia na gruntach o wysokiej rezystywności. Zaprezentowane wyniki obliczeń teoretycznych i symulacji komputerowych zostały uzupełnione pomiarami uzemień słupów linii prowadzonymi podczas procesu budowy.

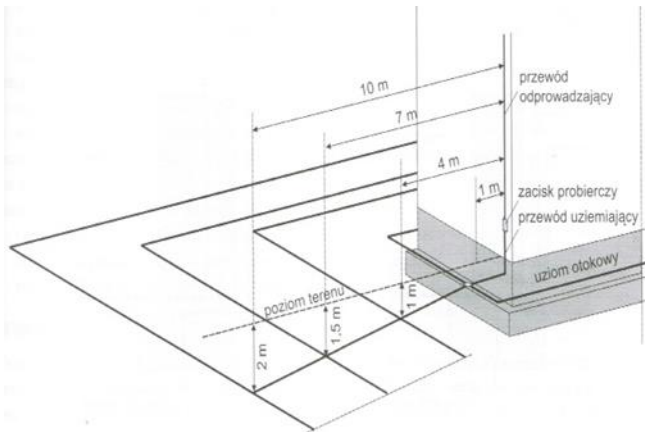
### 2. KONSTRUKCJE UZIEMIEN ŚLUPÓW

Dla obiektów budowlanych zalecane jest stosowanie uziumu otokowego układanego w odległości nie mniejszej niż 1 m od krawędzi chronionego obiektu. Jeżeli jednak pojedynczy uzium otokowy nie zapewnia wymaganych parametrów uziumu, wtedy można zastosować ułożenie dodatkowych uziumów otokowych w odstępach około 3 m od kolejnych otoków. W miarę zwiększającej się odległości od obiektu należy zwiększać głębokość układania uziumów. Przykładowa konfiguracja tak rozbudowanego systemu uziumów otokowych została przedstawiona na rysunku 1 [2].

Zgodnie ze standardami Polskich Sieci Elektroenergetycznych (PSE) uzimienia słupów powinny być dobrane do warunków zwarciovych linii, ale ich rezystancja nie powinna przekraczać 15  $\Omega$  [4]. Rezystancja uziumu otokowego może być obliczona na podstawie następującego wyrażenia [2]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{5,53l^2}{hd} \quad (1)$$

gdzie  $l$  oznacza sumaryczną długość boków otoku kwadratowego,  $h$  – głębokość pograżenia otoku w gruncie,  $d$  – średnicę zastępczą elementu uziomu. Obrys słupa linii 400 kV u jego postawy może mieć wymiar kwadratu o boku ok. 9 m. W przypadku linii nadleśnych przepisy PSE stanowią, że „dla stanowisk słupów nadleśnych należy wykonać wycinkę drzew wokół słupa w obszarze czworokąta o bokach równoległych do obrysu słupa u podstawy i odległych minimum 7 m od tego obrysu” [5]. Tak wyznaczony obszar zgodnie z rysunkiem 1 daje możliwość wykonania 3 otoków. Dla pierwszego uziomu otokowego z rysunku 1 wykonanego z płaskownika o zastępczej średnicy 0,02 m umieszczonego na głębokości 0,7 m rezystancja obliczona według wzoru (1) utrzymuje się poniżej granicy 15  $\Omega$  w przypadku rezystywności gruntu do 300  $\Omega\text{m}$ .



Rys. 1. Zalecane rozmieszczenie kilku otoków w układzie uziemiającym rozbudowanym dookoła obiektu budowlanego [2]

Taki zakres rezystywności jest spotykany na znacznym obszarze Polski, ale są też miejsca o znacznie mniej przewodzących gruntach. Budowana na Pomorzu linia 400 kV na pewnym odcinku przebiega przez tereny leśne o rezystywności gruntu sięgającej nawet 3000  $\Omega\text{m}$ . Wyznaczony obszar wycinki drzew pozwala na pograżenie 3 otoków wymiarowanych według rysunku 1. Równoległe połączenie rezystancji takich 3 otoków daje wypadkową rezystancję równą 32  $\Omega$ . Zakładając współczynnik wykorzystania uziomów wynikający z ich wzajemnego oddziaływania na poziomie 0,8, rezystancja wypadkowa uziemienia jest dość skomplikowana i kosztowna w wykonaniu, a mimo to jego parametry znacznie przekraczają poziom dopuszczany przepisami. Ponadto podczas pomiarów odbiorczych nawet podczas suszy obowiązują współczynniki sezonowych zmian rezystywności, których minimalna wartość w zależności od rodzaju uziomu jest zawarta w granicach 1,1 - 1,4 [6]. W trudnym terenie nawet tak pozornie niewielkie współczynniki często decydują o klasyfikacji wyniku pomiaru i konieczności ponoszenia dodatkowych kosztów np. poprzez uzupełnianie układu uziemiającego uziomami pionowymi.

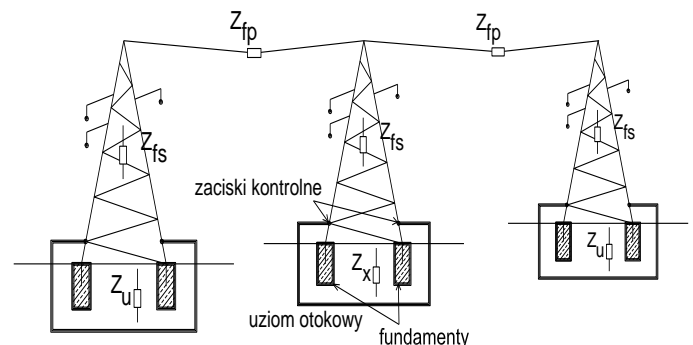
### 3. POMIARY UZIEMIEN ŚLUPÓW

Ocena rezystancji statycznej uziemień słupów linii elektroenergetycznych jest realizowana najczęściej za pomocą mierników pracujących przy częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości sieciowej. Mierniki takie pracują zwykle w oparciu o metodę techniczną, a pomiar jest realizowany w układzie 3-elektrodowym z użyciem 2 sond

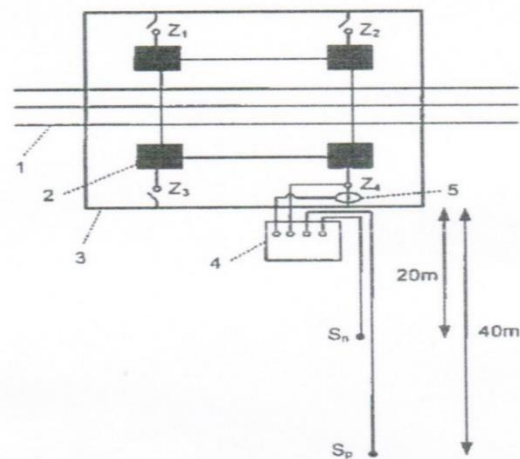
pomocniczych. Dodatkową trudnością jest fakt, że uziemienia linii są połączone równoległe ze względu na obecność przewodów odgromowych, jak to zostało przedstawione na rysunku 2. W takiej sytuacji są możliwe dwa zasadnicze sposoby realizacji pomiaru: odłączenie uziomu sztucznego od konstrukcji słupa lub zastosowanie miernika z cęgami prądowymi. W przypadku całkowitego odłączenia uziemienia od konstrukcji słupa przepisy zwykle wymagają wyłączenia linii na czas wykonywania pomiaru.

#### 3.1. Pomiar uziemienia sztucznego z zastosowaniem cęgów

Wprowadzona przez PSE Standardowa Specyfikacja Techniczna dotycząca uziemień wprowadza pomiar rezystancji uziemień słupów takich linii metodą niskoczęstotliwościową z użyciem miernika wyposażonego w cęgi w sposób pokazany na rysunku 3 [6].



Rys. 2. Sposób połączenia mierzonego uziomu z uwzględnieniem bocznikującego wpływu słupów sąsiednich oraz stopy fundamentowe słupa wraz z uziomem otokowym



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego (rzut z góry) do pomiaru rezystancji uziemienia słupa linii elektroenergetycznej WN z wykorzystaniem cęgów, z częściowo rozpiętymi zaciskami probierczymi; 1 – linia WN, 2- stopa (uziom fundamentowy) słupa, 3 – uziom otokowy, 4 – miernik rezystancji uziemienia, 5 – cęgi pomiarowe.  $Z_1 - Z_4$  – zaciski probiercze uziomu otokowego,  $S_n, S_p$  – sonda napięciowa i prądowa [6]

Do zaproponowanej metody pomiaru można wnieść 2 podane niżej uwagi.

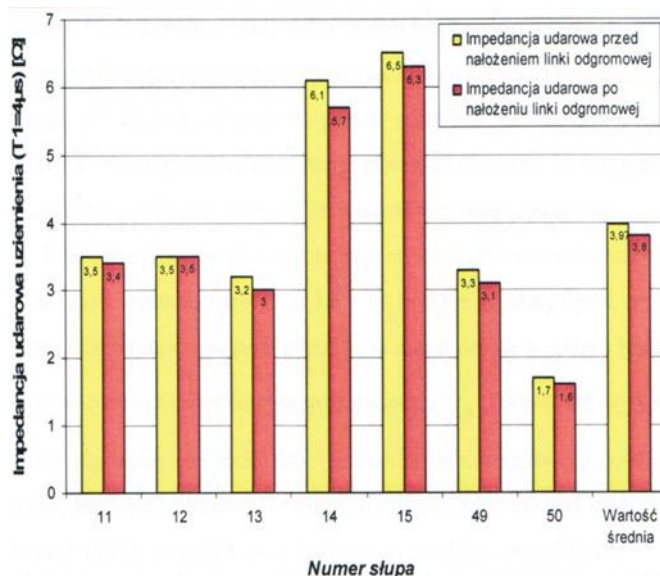
- Taki sposobu pomiaru nie uwzględnia prądu płynącego przez fundament słupa i uzyskany w taki sposób wynik pomiaru rezystancji uziomu jest zawyżony w stosunku do rezystancji, która byłaby rejestrowana podczas rozplywu rzeczywistego prądu wyładowania

atmosferycznego wykorzystującego także drogę przez fundament słupa.

- Uziemienie testowanego słupa jest podczas pomiaru połączone równolegle z uziemieniami wszystkich słupów danej linii. Prąd generowany przez miernik zamyka się przez uziemienia wszystkich słupów, a więc wartość prądu rejestrowanego przez cęgi stanowi niewielki ułamek prądu całkowitego miernika. Pomiar tak małych prądów jest obciążony większym błędem, a jeżeli taka procedura pomiarowa odbywa się dodatkowo przy załączonej linii, wynik końcowy może zawierać w sobie jeszcze większy błąd.

### 3.2. Pomiar uziemienia metodą uderową

Pomiar uziemień słupów linii elektroenergetycznych bez konieczności odłączania uziołów od słupa jest możliwy przy zastosowaniu mierników generujących wymuszenia szybkozmiennie. W praktyce oznacza to mierniki uderowe lub wysokoczęstotliwościowe. Długość przebiegu linii zwykle przekracza 150 m i dla takich przebiegów zamiast klasycznej impedancji przewodów odgromowych trzeba brać pod uwagę ich impedancję falową. Impedancja falowa w układzie przewodów odgromowy – ziemia wynosi około 500  $\Omega$ . Mierzone uziemienie słupa jest więc bocznikowane impedancjami falowymi przewodów odgromowych oraz słupów jak to zostało pokazane na rysunku 2. Taki sposób pomiaru umożliwia radykalne zmniejszenie wpływu bocznikowania testowanego uziemienia przez uziemienia innych słupów. Prezentowane w literaturze wyniki badań wskazują, że ten wpływ nie przekracza 10% [9,14].



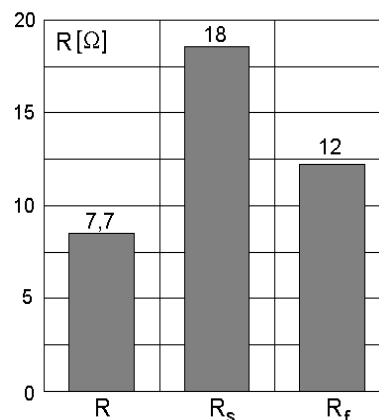
Rys. 4. Impedancja uziemienia 7 słupów linii 110 kV zmierzona przed i po nałożeniu przewodów odgromowych; ostatni histogram przedstawia wartości średnie z 7 pomiarów [7]

Potwierdzeniem wniosków o niewielkim wpływie bocznikowania uziemieniami sąsiednich słupów są przedstawione na rysunku 4 wyniki pomiarów impedancji uziemień 7 słupów linii 110 kV o podanych pod histogramami numerach. Pomiar impedancji zostały przeprowadzone za pomocą dostępnego na rynku uderowego miernika uziemień generującego prąd o amplitudzie ok. 1 A i czasie czoła udaru 4  $\mu$ s. Układ uziemienia każdego ze słupów składał się z uziołu otokowego połączonego równolegle z czterema fundamentami stopowymi stabilizującymi konstrukcję słupa. Histogramy wykresu

opisane jako „impedancja przed nałożeniem linki odgromowej” oznacza wyniki pomiarów uziemień słupów, które zostały wykonane przed zamontowaniem przewodów odgromowych, a histogramy z adnotacją „po nałożeniu linki odgromowej” – wyniki po zamontowaniu przewodów odgromowych. Różnica wartości obu wyników pokazuje wpływ bocznikowania przez uziemienia sąsiednich słupów na otrzymywane rezultaty pomiarów i średnia różnica obu wartości impedancji wskazana w ostatnim histogramie wynosi ok. 4% - spadek wartości z 3,97 do 3,80  $\Omega$ .

W rzeczywistych układach uziemień słupów, uzioł fundamentowy może w znacznym stopniu wpływać na wypadkową wartość rezystancji uziołu i decydować o końcowej ocenie wyniku pomiaru. Potwierdzeniem takiej sytuacji są wyniki pomiarów słupa posadowionego w gruncie o rezystywności ok. 200  $\Omega$ m zamieszczone na rysunku 5. Podczas pomiaru rezystancji odłączonego od słupa uziołu sztucznego otrzymano wynik  $R_s$  równy 18  $\Omega$ , co jest wartością zbyt wysoką w stosunku do wymagań normy. Wartość rezystancji fundamentu analizowanego słupa wynosi 12  $\Omega$ . Przy równoległym połączeniu obu elementów uziemienia uzyskano wynik 7,7, a to oznacza spełnienie wymagań przepisów.

W liniach przesyłowych 400 kV słupy przelotowe są osadzone zwykle przy wykorzystaniu fundamentów prefabrykowanych. Jednym z najczęściej stosowanych jest fundament ESF 300x380/330. Podczas budowy linii 400 kV przebiegającej przez Podlasie i Mazury w stronę granicy z Litwą były przeprowadzone badania polegające na pomiarze rezystancji statycznej każdej ze stóp fundamentu, a następnie pomiarze równoległe połączonej 4 stóp fundamentowych. Rysunek 6 przedstawia fotografię z procesu budowy z widokiem 2 stóp. Badaniom poddano 9 stanowisk słupowych osadzonych w różnorodnych gruntach – od terenów podmokłych do terenów gdzie występowały żwiry i piaski. Rezystywności gruntu były zawarte w szerokim przedziale od 30 do 700  $\Omega$ m. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 7.



Rys. 5. Wyniki pomiarów rezystancji statycznej uziemienia słupa linii 110 kV z przewodem odgromowym odłączonym od jego konstrukcji: R - rezystancja równoległego połączenia fundamentu i uziołu sztucznego,  $R_s$  - rezystancja uziołu sztucznego,  $R_f$  - rezystancja fundamentu słupa

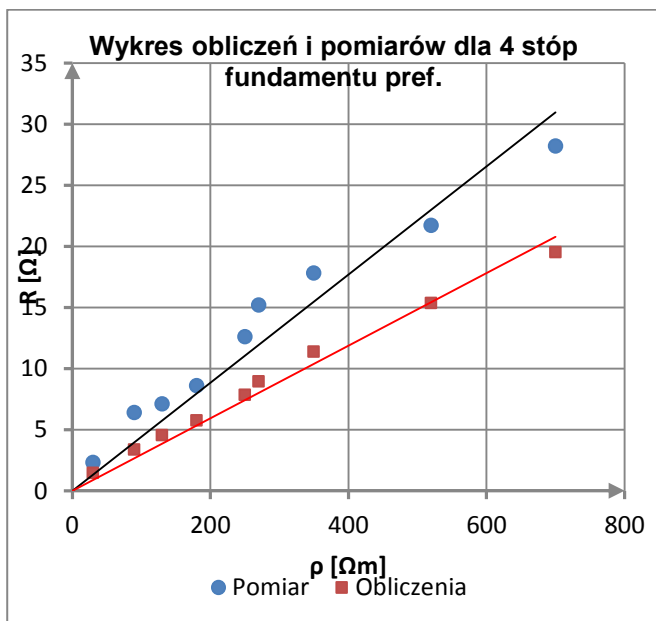
Prosta na rysunku 7 opisana jako „obliczenia” obrazuje wyniki obliczeń otrzymane jako rezultat równoległego połączenia indywidualnie zmierzonej rezystancji każdej z 4 stóp fundamentowych poszczególnych słupów. Prosta określona jako „pomiar” powstała jako interpolacja

wyników pomiarów wykonanych na równoległe połączonych 4 stopach fundamentowych każdego z analizowanych 9 słupów. Stosunek wyników otrzymanych w rezultacie „obliczeń” do rezultatów „pomiarów” oznacza współczynnik wykorzystania równoległe połączonych elementów uziemień i dla analizowanego przypadku wynosi ok. 0,68. Otrzymany współczynnik jest zbliżony do wartości podawanych w literaturze przedmiotu. Z zaprezentowanego wykresu wynika, że wartość rezystancji uziemienia do 10 Ω jest zapewniona przez fundamenty słupa w gruntach do ok. 200 Ωm, a wartość 15 Ω - w gruntach nawet do ok. 300 Ωm.

W oparciu o przedstawione wyniki pomiarów można zauważyć, że metody oceny uziemień słupów bez uwzględnienia roli fundamentów stosowane przez niektórych operatorów sieci mogą generować zbędne koszty dodatkowe zarówno na etapie inwestycji, jak również podczas eksploatacji.



Rys. 6. Fotografia 2 stóp fundamentu słupa linii 400 kV podczas budowy [8]



Rys. 7. Wyniki obliczeń i pomiarów rzeczywistych rezystancji fundamentów 9 słupów [8]

Schemat zastępczy uziomu poziomego może być przedstawiony w postaci n połączonych szeregowo czwórników, jak to zostało przedstawione na rysunku 8. Każdy z czwórników powstaje w wyniku obliczeń parametrów jednostkowego elementu długości uziomu. Rezystancja uziomu wyznaczana przy wymuszeniu  $i(t)$  wolnozmiennym, np. zbliżonym do częstotliwości sieciowej, polega w praktyce na określeniu wypadkowej wartości przewodności doziemnej  $G$ , która jest rezultatem równoległego połączenia składowych od  $G1$  do  $Gn$  według rysunku 8. System pomiarowy wskaże więc rezystancję uziomu jako  $R_u = 1/G$ . Uzyskany wynik reprezentuje rezystancję przejścia z uziomu do otaczającego gruntu. Wpływ na tę rezystancję ma rezystywność gruntu oraz wymiary uziomu. Przy wymuszeniach niskiej częstotliwości pozostałe elementy uwidocznione na schemacie zastępczym mają pomijalny wpływ na uzyskany wynik z następujących względów:

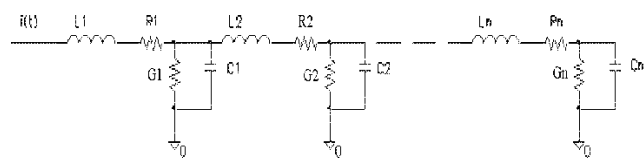
- rezystancja podłużna uziomu, która stanowi sumę elementów od  $R1$  do  $Rn$  jest bardzo mała z powodu znacznego przekroju metalowego uziomu,
- indukcyjność uziomu jest szacowana w przedziale 1-2 μH/m, a więc elementy  $L1$  do  $Ln$  stanowią niewielką reaktancję przy przebiegach o niskiej częstotliwości,
- pojemności własne uziomu reprezentowane przez elementy  $C$  są również do pominięcia przy przebiegach niskoczęstotliwościowych.

Podwyższenie częstotliwości sygnału wymuszającego  $i(t)$  powoduje wzrost reaktancji indukcyjnej  $\omega L$  poszczególnych elementów uziomu i to prowadzi w większości przypadków do wzrostu impedancji wypadkowej uziomu rejestrowanej na jego zacisku wejściowym.

Analiza linii modelującej uziom długi i uwzględnienie prędkości rozprzestrzeniania się fal w uziemiu wskazują, że wzrost długości uziomu powoduje obniżanie jego impedancji tylko do pewnej ograniczonej wartości nazywanej długością efektywną  $l_{ef}$ . Długość to może być wyznaczona jako [10]:

$$l_{ef} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{T}{GL}} \quad (2)$$

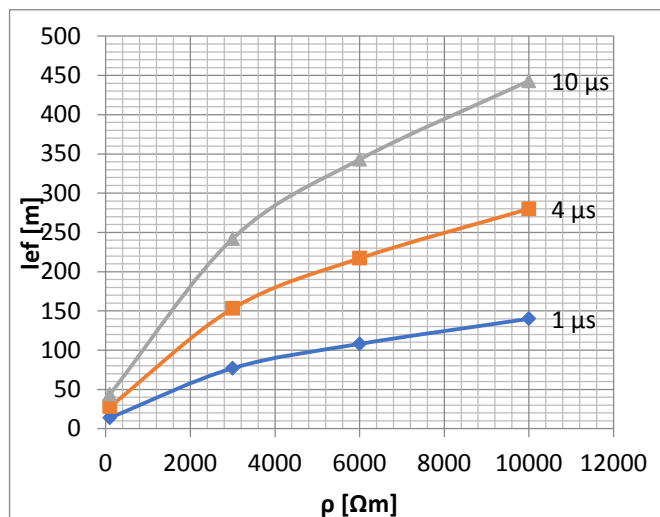
gdzie:  $T$  jest czasem trwania czoła udaru prądowego,  $L$  - indukcyjnością jednostkową i  $G$  - konduktancją jednostkową analizowanego uziomu.



Rys. 8. Schemat zastępczy uziomu poziomego złożonego z n elementów jednostkowych, R – rezystancja podłużna elementu, L – indukcyjność elementu, G – przewodność poprzeczna między uziomem a otaczającym gruntem, C- pojemność elementu

Długość efektywna uziomu obliczona z wyrażenia (2) zależy przede wszystkim od rezystywności gruntu otaczającego analizowany uziom oraz stromości czoła odprowadzanego do ziemi udaru. Na rysunku 9 zamieszczono krzywe przedstawiające długość efektywną uziomu w funkcji rezystywności gruntu dla udarów

o czasach czoła 1, 4 oraz 10  $\mu\text{s}$ . Długość efektywna uziomu, która bierze udział w rozpraszaniu prądu piorunowego w ziemi rośnie wraz z rezystywnością gruntu. W przypadku najczęściej używanego w ocenie uziemień udaru o czasie czoła 4  $\mu\text{s}$  w gruncie o rezystywności 3000  $\Omega\text{m}$  spotykanej w przypadku wspomnianej wyżej linii 400 kV osiąga wartość ok. 150 m. Tak duża długość efektywna uziomu umożliwia rozbudowę systemu uziemień do znacznych rozmiarów, co ułatwia osiągnięcie rezystancji wymaganej przez przepisy.



Rys. 9. Zmiany długości efektywnej uziomu w funkcji rezystywności gruntu dla podanych czasów czoła udarów [11]

#### 4. WŁAŚCIWOŚCI UZIEMIEŃ NA GRUNTACH O WYSOKIEJ REZYSTYWNOCI

Parametry czwórnika schematu zastępczego uziomu z rysunku 8 zostały wyznaczone w oparciu o wyrażenia dostępne w literaturze przedmiotu [12]. W gruntach o wysokiej rezystywności wartość w ten sposób wyznaczonej przewodności poprzecznej  $G$  w schemacie zastępczym przyjmuje bardzo małe wartości. W takich warunkach znaczący wpływ na rozpraszanie w gruncie prądów może mieć pojemność  $C$ . Zwłaszcza dla prądów szybkozmiennych reaktancja pojemnościowa gałęzi poprzecznej nie może być pomijana w odniesieniu do bardzo małych wartości połączonej równolegle przewodności  $G$ . Na rysunku 10 zostały przedstawione zrealizowane w programie Matlab Simulink wyniki obliczeń symulacyjnych zmian współczynnika udarowego 1 m uziomu poziomego w funkcji rezystywności gruntu. Współczynnik udarowy uziomu jest definiowany jako:

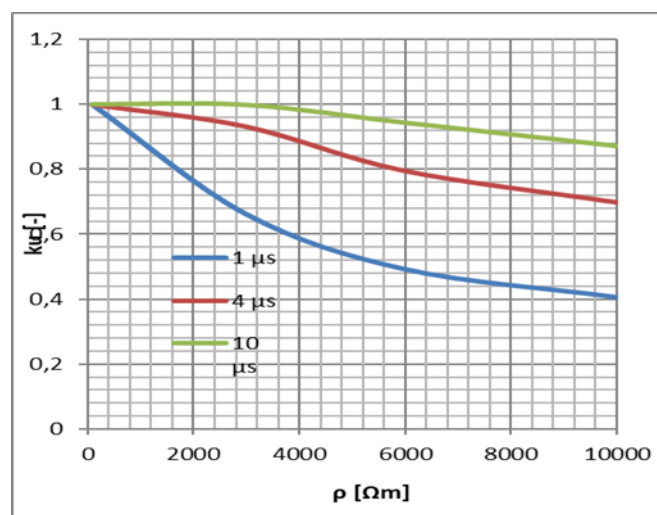
$$k_u = Z_u / R_{st} \quad (3)$$

gdzie  $R_{st}$  oznacza rezystancję statyczną uziomu, a  $Z_u$  – jego impedancję udarową. Wymienione obliczenia symulacyjne parametrów uziomu zostały przeprowadzone przy prądach rzędu pojedynczych amperów, które nie mogą powodować wyładowań w gruncie.

W przypadku najczęściej używanego podczas pomiarów udaru o czasie czoła 4  $\mu\text{s}$  współczynnik udaru uziomów skupionych pogrążonych w gruncie o rezystywności poniżej 1000  $\Omega\text{m}$  jest równy 1 lub niewiele przekracza tę wartość. Wyniki przedstawione na rysunku 10 wskazują, że dla gruntów o wysokiej rezystywności

współczynnik udaru może przyjmować wartości poniżej 1, np. dla udaru 4  $\mu\text{s}$  i rezystywności gruntu 3000  $\Omega\text{m}$  wynosi ok. 0,9, a dla udaru 1  $\mu\text{s}$  – ok. 0,7. Publikowane w literaturze wyniki pomiarów uziemień stanowisk słupowych linii przesyłowych w Brazylii posadowionych na gruntach o bardzo wysokiej rezystywności wskazują, że współczynnik udarowy osiąga wartości w granicach 0,7 – 0,8. Prezentowane tam wartości współczynnika udarowego są definiowane według wyrażenia (3) i zostały zarejestrowane przy prądach rzędu kilku amperów, a więc nie może być rozważane zjawisko wieloprądowe [14,15].

Występowanie współczynnika udaru poniżej wartości 1 zostało potwierdzone pomiarami uziemienia słupa linii 400 kV przeprowadzonymi na etapie budowy przed zamontowaniem przewodów odgromowych. Pomierzona wartość rezystywności gruntu w sąsiedztwie słupa wynosiła 3080  $\Omega\text{m}$ , a rezystancja statyczna uziemienia słupa w formie kombinacji uziomu otokowego i uziomów pionowych łącznie z jego fundamentami wynosiła 27,8  $\Omega$ . Impedancja udarowa tego układu uziemiającego osiągnęła wartość 24,4  $\Omega$  przy udarze pomiarowym o czole 4  $\mu\text{s}$  oraz 19,7  $\Omega$  przy udarze 1  $\mu\text{s}$ . Otrzymane stąd wartości współczynnika udarowego uziemienia słupa wynosiły 0,88 i 0,71 odpowiednio dla udarów 4  $\mu\text{s}$  raz 1  $\mu\text{s}$ .



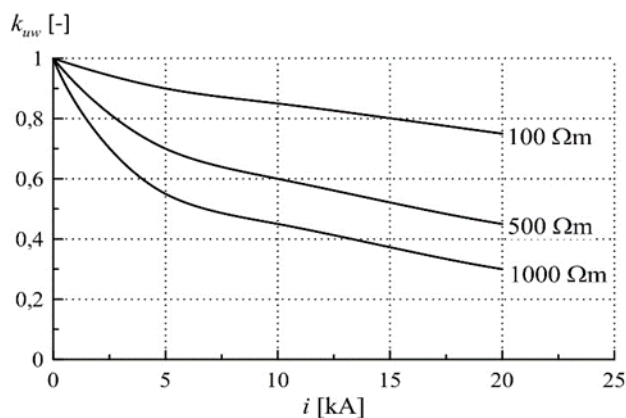
Rys. 10. Wyniki obliczeń symulacyjnych wpływu rezystywności gruntu na współczynnik udarowy uziomu o długości 1 m [11]

Przytoczone wartości współczynnika udaru są wprawdzie rezultatem pomiarów tylko pojedynczego słupa, ale pokazują tendencję zbliżoną do charakteru krzywych otrzymanych drogą symulacji i przedstawionych na rysunku 10 oraz wyników pomiarów prezentowanych w literaturze światowej [14, 15]. W gruntach o wysokiej rezystywności współczynnik udarowy zwłaszcza skupionych uziemień może więc mieć wartości poniżej 1. Wobec tego trudno zgodzić się ze stwierdzeniem w przepisach operatora sieci, że „nie należy wykonywać pomiarów przyrządami udarowymi, gdyż mierzone nimi wartości są zawyżone, co może prowadzić do błędnych wniosków” [6]. Duże wartości impedancji udarowej uziemień w porównaniu z ich rezystancją statyczną są notowane w rozległych uziemieniach wykonanych zwłaszcza na dobrze przewodzących gruntach, których rozmiary przekraczają długość efektywną szacowaną według wyrażenia (2). Uwagi o ograniczeniach rozległości uziemień przeznaczonych do celów ochrony odgromowej można znaleźć także w przepisach normalizacyjnych [3, 20]

Jeżeli podczas przepływu prądu piorunowego w uziemiu natężenie pola elektrycznego na styku uziomu z gruntem przekroczy wartość krytyczną  $E_k$ , na powierzchni uziomu pojawiają się wyładowania niezupełne. Zjonizowana strefa otaczająca uziom zwiększa efektywny promień uziomu. Takie pozorne zwiększanie promienia uziomu, a więc również powierzchni jego styku z gruntem, prowadzi do spadku rezystancji uziomu w miarę wzrostu natężenia rozpraszanego prądu i jest często określane jako zjawisko wielkopądowe.

Dane literaturowe wskazują, że wyładowania w gruntach żwirowych i piaszczystych są inicjowane przy mniejszych wartościach natężenia pola  $E_k$  [13]. Wobec tego można przypuszczać, że spadek rezystancji uziomu wskutek wyładowań wywołanych zwiększaniem prądu powinien być bardziej zauważalny w gruntach o wysokiej rezystywności. Miarą tych zmian może być wielkopądowy współczynnik udaru  $k_{uw}$  obliczany jako stosunek impedancji uziomu wyznaczonej przy wysokiej wartości amplitudy prądu udarowego do rezystancji statycznej uziomu mierzonej przy niewielkim prądzie przemiennym generowanym przez standardowe mierniki.

W podręcznikach rosyjskich z ubiegłego wieku są prezentowane wyniki badań impedancji udarowej uziomów prowadzone na obiektach rzeczywistych przy amplitudach prądów do kilkudziesięciu kA [17,18,19]. Na podstawie wyników zamieszczonych w tych źródłach w postaci tabelarycznej zostały sporządzone i przedstawione na rysunku 11 wykresy zmian wielkopądowego współczynnika udaru  $k_{uw}$  uziomu pionowego o długości 3 m w funkcji amplitudy prądu. Badany uziom był umieszczany w gruntach o rezystywności 100, 500 i 1000  $\Omega\text{m}$ . Wskutek wyładowań powstających w gruncie otaczającym uziom jego impedancja reprezentowana przez współczynnik  $k_{uw}$  maleje ze wzrostem amplitudy prądu. Największy spadek impedancji uziomu obserwuje się w gruntach o wysokiej rezystywności. Przy prądzie o amplitudzie 20 kA współczynnik  $k_{uw}$  w gruncie 100  $\Omega\text{m}$  maleje do wartości 0,75, a w gruncie 1000  $\Omega\text{m}$  – do wartości 0,3. Z zaprezentowanych danych wynika, że w gruntach o wysokiej rezystywności można oczekiwać większego spadku impedancji uziemienia podczas rozpraszania prądu piorunowego, niż w gruntach o małej rezystywności.



Rys. 11. Wartości współczynnika udaru wielkopądowego w funkcji amplitudy prądu uziomu pionowego o długości 3 m umieszczonego w gruntach o rezystywności 100, 500 i 1000  $\Omega\text{m}$

## 5. PODSUMOWANIE

Stosowane w praktyce eksploatacyjnej metody pomiaru uziemień słupów linii elektroenergetycznych powinny umożliwiać uwzględnianie w końcowej ocenie wpływu fundamentów słupa. Zaprezentowane wyniki badań wskazują, że rezystancja fundamentów słupa jest często porównywalna z rezystancją uziomu sztucznego, a na gruntach o dobrej przewodności wartość rezystancji uziemienia fundamentowego może już być wystarczająca.

Długość efektywna uziomów rośnie w gruntach o dużej rezystywności i to umożliwia rozbudowę oraz zwiększanie wymiarów uziemienia w celu osiągnięcia wymaganej rezystancji. Przepisy ograniczające rozmiary stanowiska słupowego na gruntach leśnych mogą blokować tę możliwość.

Zaprezentowane wyniki symulacji komputerowych oraz pomiarów na obiektach rzeczywistych wskazują, że wartość impedancji udarowej uziemienia, zwłaszcza niezbyt rozległego, pograżonego w gruncie o bardzo wysokiej rezystywności może być mniejsza niż jego rezystancja mierzona przy wymuszeniach o niskiej częstotliwości. Współczynnik udaru takiego uziemienia może więc osiągać wartości poniżej 1. Uwzględniając fakt pomijalnego wpływu uziemień sąsiednich słupów linii na wynik pomiaru, metoda udarowa oceny uziemień linii umożliwia dość wszechstronną ocenę uziemień.

Wyładowania niezupełne w gruncie otaczającym uziom podczas rozpraszania prądu piorunowego powodują obniżenie jego impedancji w porównaniu do wartości uzyskanych przy pomocy mierników pracujących przy niewielkich wymuszeniach prądowych. W gruntach suchych o wysokiej rezystywności spadek impedancji pod wpływem wzrostu amplitudy prądu jest większy niż w gruntach dobrze przewodzących – dane literaturowe wskazują, że w takich gruntach wielkopądowy współczynnik udarowy uziemienia jest mniejszy.

Przytoczone w podsumowaniu uwagi są argumentami za pozostawieniem maksymalnej dopuszczalnej wartości uziemienia słupa linii na poziomie 20  $\Omega$  w przypadku gruntów o podwyższonej rezystywności [20], a nie obniżanie jej w każdym gruncie do 15  $\Omega$  [4].

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Nowak W., Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych, Rozprawy monograficzne 139, Wydawnictwo Uczelniane AGH, Kraków 2005.
2. Markowska R., Sowa A.: Ochrona odgromowa obiektów budowlanych, Dom Wydawniczy MEDIUM, Warszawa, 2009
3. PN-EN 62305 Ochrona odgromowa. Części 1 - 4
4. Standardowa Specyfikacja Techniczna PSE: Linia napowietrzna 400 kV, Nr kodowy PSE-SF.Linia 400 kV.0 PL/2017v1
5. Standardowa Specyfikacja Techniczna PSE: Linia napowietrzna 400 kV, Uziemienia, Nr kodowy PSE-SF.Linia 400 kV.3 PL/2014v1
6. Standardowa Specyfikacja Techniczna PSE: Badanie uziemień odgromowych słupów oraz skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w napowietrznych liniach elektroenergetycznych NN, Nr kodowy „PSE-SF. Badanie uziemień. PL/2013v1

7. Piwko A.: Wpływ przewodów odgromowych na pomiary uziemień słupów linii przesyłowych, praca dypl. mgr, Wydz. AiE Politechniki Gdańskiej, 2008 rok
8. Wronowski K.: „Analiza możliwości wykorzystania konstrukcji fundamentów słupów linii elektroenergetycznej 400 kV jako uziomów w systemie ochrony odgromowej”, praca dypl. mgr, Wydz. EiA Politechnika Gdańska, 2015 rok .
9. Wojtas S. Pomiary uziemień słupów linii elektroenergetycznych, Acta Energetica, Nr 1, 2011
10. Wojtas S., Lightning impulse efficiency of horizontal earthings, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10b, 2012.
11. Budka P., Wpływ parametrów gruntu na współczynnik udarowy uziemienia, praca dypl. mgr, Wydz. AiE Politechniki Gdańskiej, 2018 rok
12. Almeida M.E., Correia de Barros M.T., Modelling of long ground electrodes for lightning studies. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 22-27 August 1999, Conference Publication No. 467
13. Łoboda M., Udarowe właściwości uziemień ochrony odgromowej obiektów budowlanych i elektroenergetycznych, WPW, Warszawa 2000.
14. S. Visacro, G. Rosado, Response of Grounding to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Nr 1, 2009.
15. Visacro S., Guimaraes M.B., Oliveira C.H.D., Achievements in the Measurement of Tower-footing. Impulse Impedance of Transmission Lines. 34 th International Conference on Lightning Protection, 02-07 September 2018, Rzeszów, Poland
16. Wojtas S.: Impulse measurement accuracy of transmission line earthings, W: 29th International Conference on Lightning Protection ICLP2008, 23rd–26th June 2008, Uppsala, Sweden, 2008. s. 112
17. K.S. Stiefanow, Technika Wysokich Napriażeń, Wyd. Energija, Leningrad, 1967
18. N. A. Tiniakow, K. F. Stiepanczuk, Technika Wysokich Napriażeń, Wyd. Wyszajnaja Szkoła, Mińsk, 1971.
19. M. E. Jerusalemow, N.N. Orłow, Technika Wysokich Napriażeń, Wyd. Kijewskij Uniwersitet, , 1967
20. PN-E/05003-1:1986 Ochrona odgromowa obiektów budowlanych - Wymagania ogólne

## **ASSESSMENT OF POWER LINE TOWER EATHINGS, ESPECIALLY THOSE LOCATED ON HIGH RESISTIVITY GROUNDS**

The article discusses the issues of measurement and evaluation of earthing properties of power line towers using low and high-frequency waveforms. Obtaining a sufficiently low resistance value of the earthing tower located on the ground of over 1000  $\Omega\text{m}$  can be difficult. The work contains an analysis of changes in static and impulse properties of earthing as a function of resistivity of the surrounding ground and current amplitude. Attention is paid to the large role of the tower foundations, which can have a significant influence on the resulting resistance of the tower's earthing. The summary contains a number of comments and advices on the design and methods for assessing earthing plunged in high resistivity grounds.

**Keywords:** earthing, earthing of line towers, earthing measurements, measurements of line tower earthings.