

POMIARY UZIEMIEŃ SŁUPÓW LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

dr inż. Stanisław Wojtas / Politechnika Gdańska

1. WPROWADZENIE

Uziemienie jest ważnym i niezbędnym elementem każdego systemu energetycznego. Prawidłowo zaprojektowane i wykonane uziemienie gwarantuje bezpieczeństwo ludziom, jak i urządzeniom znajdującym się w miejscach, gdzie może wystąpić przepływ groźnego prądu zwarciovego bądź prądu udarowego, pochodzącego z wyładowań atmosferycznych. W związku z tym należy dołożyć starań, aby rezystancja takiego uziemienia była jak najmniejsza, a jej wartość spełniała wytyczne zawarte w określonych normach i przepisach.

Podczas budowy, a później eksploatacji uziemienie powinno być poddawane okresowej kontroli, głównie poprzez wykonywanie pomiarów wartości jego rezystancji. Badania kontrolne rezystancji prowadzone metodą tradycyjną okazują się często bardzo czasochłonne, zwłaszcza w przypadku uziemień słupów linii elektroenergetycznej. Przykładowo, stukilometrowy odcinek linii 110 kV składać się może z ponad 300 słupów, a uziemienie każdego powinno być sprawdzone przynajmniej co cztery [2] lub pięć lat [5]. Istotne jest zatem, aby badania mogły odbywać się bez wyłączenia linii, czas pomiaru pojedynczego słupa był możliwie jak najkrótszy, a przyrządy pomiarowe lekkie i łatwe do przenoszenia.

Celem prezentowanej pracy jest opis procedur pomiaru i oceny uziemień słupów elektroenergetycznych linii przesyłowych zaopatrzonych w przewody odgromowe. Przedmiotem analizy jest przede wszystkim wpływ długości pręseł oraz czasu czoła zastosowanych udarów pomiarowych na otrzymane wyniki impedancji uziemień. Zaprezentowane wyniki obliczeń teoretycznych i symulacji komputerowych zostały uzupełnione pomiarami na obiektach rzeczywistych.

2. METODY KLASYCZNE OCENY UZIEMIEŃ SŁUPÓW

Rezystancja statyczna uziemień słupów jest najczęściej określana za pomocą mierników pracujących przy niskiej częstotliwości i realizujących różne odmiany metody technicznej. W przypadku słupów linii przesyłowych wysokiego napięcia ich uziemienia są połączone równolegle poprzez przewody odgromowe, jak to zostało przedstawione na rys. 1. W związku z tym można wyróżnić dwa zasadnicze sposoby przeprowadzenia pomiaru: odłączanie uziomu sztucznego od konstrukcji słupa i zastosowanie miernika z cęgami prądowymi.

2.1. Odłączanie uziomu od konstrukcji słupa

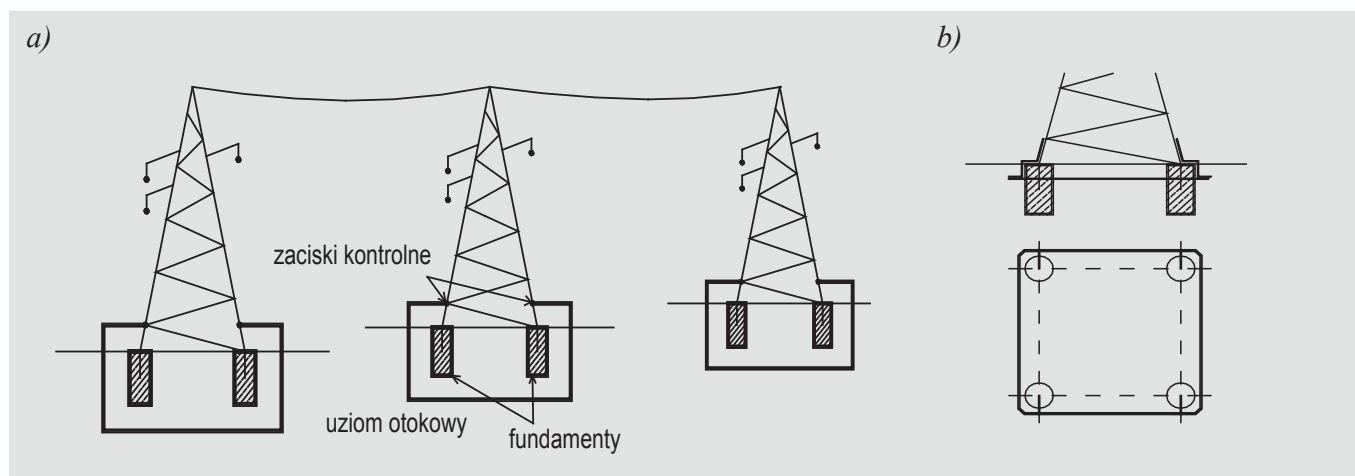
Stosując wymuszenie niskoczęstotliwościowe, na czas pomiaru należy rozłączyć zaciski kontrolne, a więc usunąć połączenie między uziomem sztucznym, np. otokowym, a konstrukcją słupa. Zabieg taki jest dość uciążliwy i wymaga rozkręcenia czterech połączeń – po jednym przy każdej nodze słupa (rys. 1b). Poza tym otrzymana

Streszczenie

W odprowadzaniu do ziemi prądu zwarciovego lub piorunowego biorą udział elementy uziomu sztucznego słupa oraz jego fundamenty. Podczas pomiarów kontrolnych rezystancji lub impedancji takich uziemień powinny być uwzględniane oba elementy uziemienia. Ponadto procedura pomiarowa musi brać pod uwagę fakt, że uziemienia słupów linii są połączone równolegle poprzez przewody odgromowe. W artykule została omówiona problematyka pomiaru i oceny właściwości uziemień słupów linii elektroenergetycznych z wykorzystaniem przebiegów wolno- i szybkozmiennych. Pomiary rezystancji uziemień słupów przy użyciu mierników stosujących

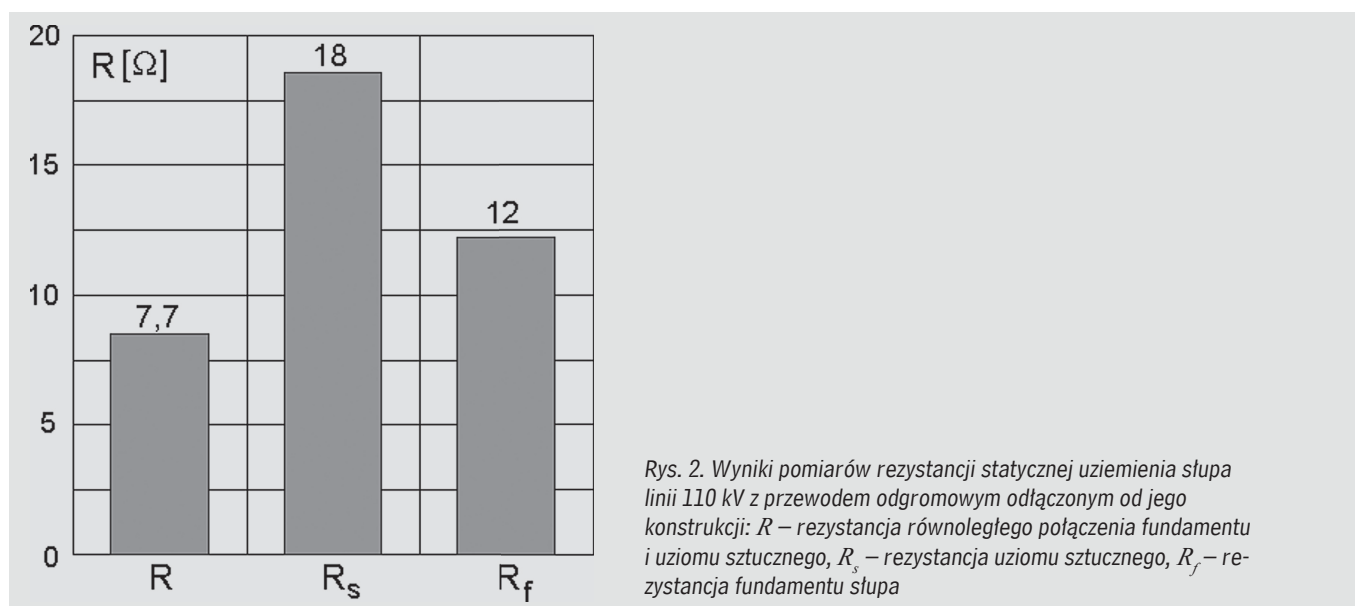
częstotliwości zbliżone do sieciowych są uciążliwe i pracochłonne. Wpływ uziemień sąsiednich słupów może być zredukowany poprzez wykorzystanie impedancji falowej przewodów odgromowych przy przebiegach wysokiej częstotliwości lub udarowych. W wyniku porównania obu metod opartych na przebiegach szybkozmiennych okazuje się, że mierniki udarowe są znacznie bardziej odporne na zakłócenia wywołane polem elektromagnetycznym linii. W pracy został przeanalizowany wpływ czasu czoła udaru oraz długości pręśla linii na błędy popełniane podczas pomiarów z zastosowaniem mierników udarowych.

w ten sposób wartość rezystancji wynika wyłącznie z uziomu sztucznego, a naturalny uziom fundamentowy nie ma wpływu na rezultat pomiaru. Należy też zwrócić uwagę, że pomiary takie powinny być wykonywane po wyłączeniu linii.



Rys. 1. Sposób połączenia mierzonego uziomu z uwzględnieniem bocznikującego wpływu słupów sąsiednich – a) oraz stopy fundamentowe słupa wraz z uziomem otokowym – b)

W rzeczywistych układach uziemień słupów uziom fundamentowy może w znacznym stopniu wpływać na wypadkową wartość rezystancji uziomu i decydować o końcowej ocenie wyniku pomiaru. Potwierdzeniem takiej sytuacji są wyniki pomiarów słupa posadzonego w gruncie o rezystywności ok. 200 Ωm zamieszczone na rys. 2. Podczas pomiaru rezystancji odłączonego od słupa uziomu sztucznego otrzymano wynik R_s równy 18 Ω , co jest wartością zbyt wysoką w stosunku do wymagań normy [1]. Wartość rezystancji fundamentu analizowanego słupa wynosi 12 Ω , a przy równoległym połączeniu obu elementów uziemienia uzyskano wynik 7,7, co oznacza, że są spełnione wymagania wspomnianych przepisów.



Rys. 2. Wyniki pomiarów rezystancji statycznej uziemienia słupa linii 110 kV z przewodem odgromowym odłączonym od jego konstrukcji: R – rezystancja równoległego połączenia fundamentu i uziomu sztucznego, R_s – rezystancja uziomu sztucznego, R_f – rezystancja fundamentu słupa

2.2. Zastosowanie miernika z cęgami pomiarowymi

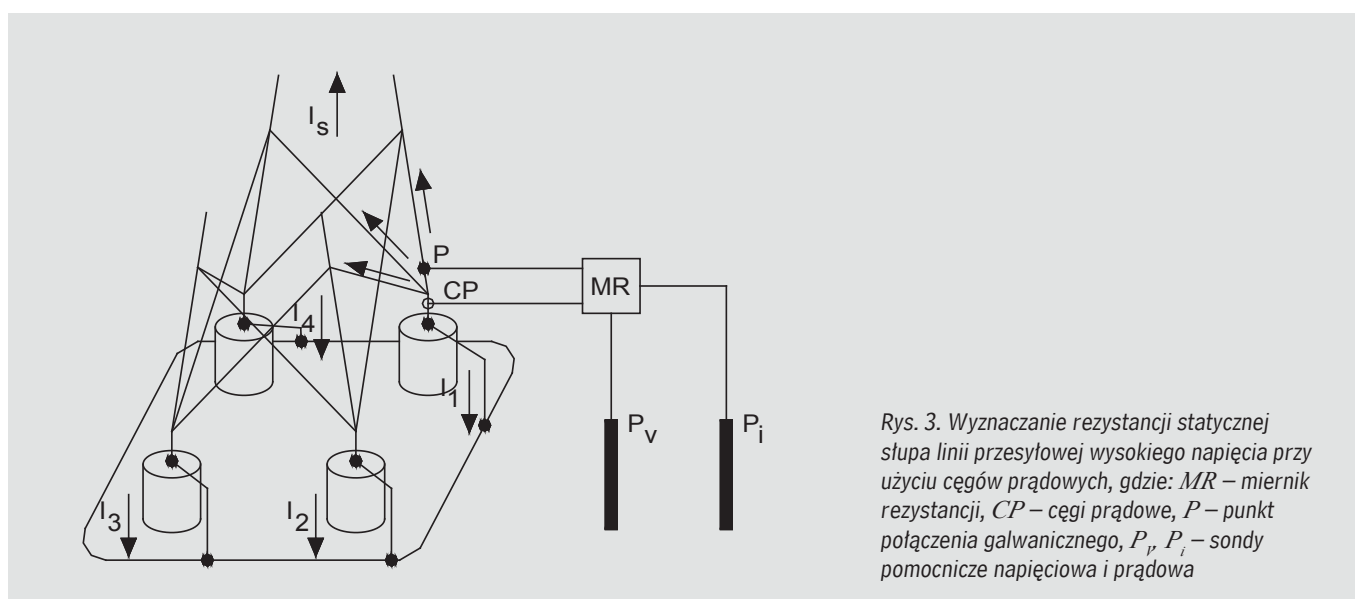
Szczególną odmianą metody technicznej realizuje miernik z cęgowym pomiarem prądu. W przypadku wykorzystywania takiego miernika nie rozłącza się zacisków probierczych, a prąd generowany w mierniku, spływając do ziemi w systemie połączonych uziemień, dzieli się na dwie części. Jedna z nich przepływa przez badany przewód oraz uziom, druga zaś przez całą resztę systemu uziemień. Omawiany przypadek zilustrowany jest na rys. 3. Wynik pomiaru ustalany jest na podstawie wartości tylko tej części prądu, która przepływa przez badany przewód uziemiający. Spadek napięcia, tak jak uprzednio, wyznaczany jest w odniesieniu do sondy pomocniczej umieszczonej w strefie ustalonego potencjału.

Pomiary uziemień słupów za pomocą tej metody są możliwe wtedy, gdy miernik wyposażony jest w cęgi prądowe o bardzo dużej średnicy okna pozwalającej objąć pojedynczą nogę słupa linii przesyłowej. W celu wyznaczenia rezystancji uziemia słupa należy wykonać cztery odrębne pomiary cząstkowe, po jednym dla każdej nogi słupa. Wynik końcowy wyznacza się na drodze obliczeniowej jako równoległe połączenie zmierzonych rezystancji cząstkowych.

Prąd generowany w mierniku wpływa do konstrukcji słupa w miejscu galwanicznego połączenia (P). Z tego miejsca prąd rozptyla się we wszystkie strony przez przewodzącą konstrukcję słupa. Część tego prądu płynie ku górze jako I_s i linką odgromową odplywa do innych słupów systemu. Pozostała część prądu wpływa do badanego uziemia i następnie do gruntu poprzez cztery nogi słupa. Prąd płynący do gruntu jest więc sumą prądów od I_1 do I_4 w poszczególnych nogach słupa. Dla pomiarów poszczególnych nóg słupa napięcie U wyznaczane w odniesieniu do strefy ustalonego potencjału powinno mieć taką samą wartość. Różnice wyników w tych pomiarach mogą więc być wywołane jedynie różnicami prądów odprowadzanych do gruntu przez poszczególne nogi słupa. Można więc w efekcie napisać, że rezystancja całkowita uziemia słupa wynika z równoległego połączenia rezystancji cząstkowych otrzymanych dla poszczególnych nóg:

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^{-1} \quad (1)$$

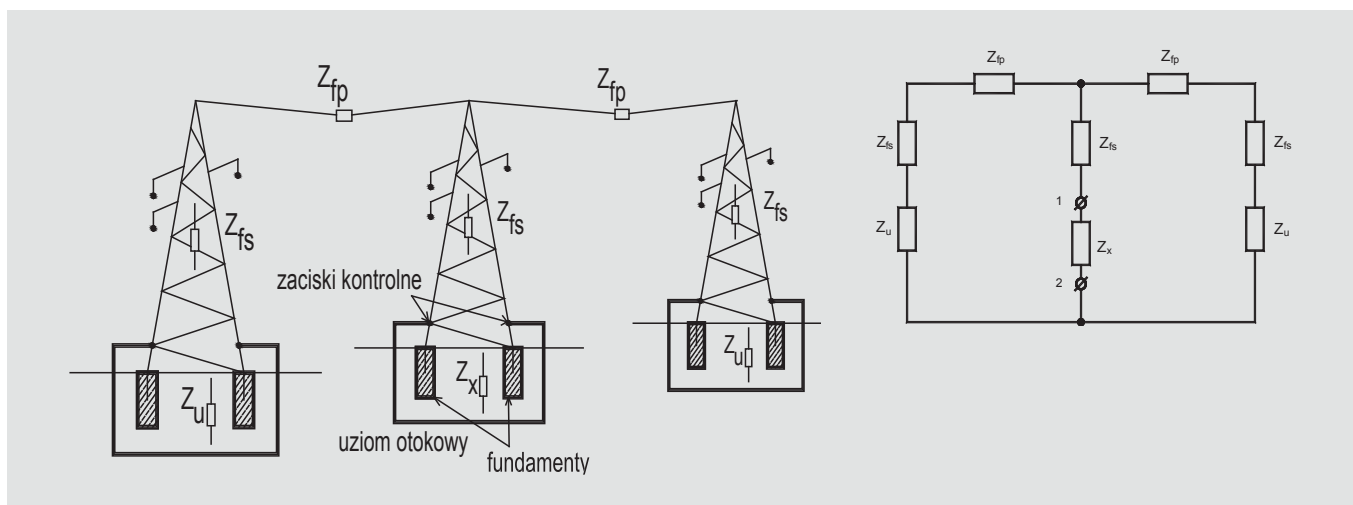
Należy jednak zauważyć, iż zależność powyższa będzie poprawna jedynie wówczas, gdy dla wszystkich pomiarów cząstkowych nie będzie zmieniany punkt P połączenia miernika ze słupem [10].



3. METODA UDAROWA

3.1. Zasada pomiaru

Metoda udarowa pozwala mierzyć uziemia słupów linii przesyłowej za pomocą odpowiedniego przyrządu pomiarowego bez odpinania uziomu od konstrukcji słupa. Długość przęsła w liniach w większości przypadków przekracza 150 m, a impedancja falowa Z_{fp} w układzie przewod – ziemia wynosi około 500Ω [9]. Podczas pomiarów uziemie badane o impedancji Z_x jest bocznikowane impedancjami falowymi Z_{fp} przewodów odgromowych biegnących do obu sąsiednich słupów oraz impedancjami falowymi Z_{fs} słupów, jak to przedstawiono na rys. 4. Wartości impedancji uziemień poszczególnych słupów oznaczono jako Z_u oraz Z_x .



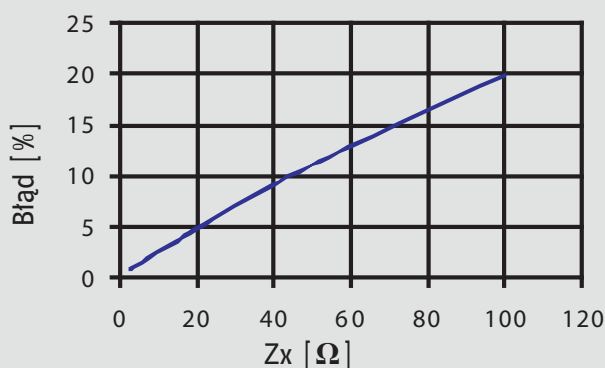
Rys. 4. Układ uziemienia słupa wraz ze słupami sąsiadującymi i zaznaczonymi wartościami impedancji falowych poszczególnych elementów systemu

W tak przyjętym układzie wartość impedancji podczas pomiaru na zaciskach uziomu mierzonego Z_x może być obliczona według następującego wzoru:

$$Z_m = \frac{[Z_{fs} + 0,5x(Z_{fp} + Z_{fs} + Z_u)]xZ_x}{Z_x + 0,5x(Z_{fp} + Z_{fs} + Z_u)} \quad (2)$$

Rys. 5 przedstawia wpływ bocznikowania uziemieniami sąsiednich słupów podczas pomiaru uziemienia Z_x w funkcji wartości tego uziemienia. Błąd względny wartości zmierzonej Z_m wskutek bocznikowania wyznaczano na podstawie wzoru (2) jako $(Z_x - Z_m)/Z_x$. Obliczenia zostały wykonane przy następujących założonych wartościach poszczególnych impedancji: $Z_{fp} = 500 \Omega$, $Z_{fs} = 100 \Omega$ [9] oraz $Z_u = 10 \Omega$. Na podstawie przedstawionego wykresu można zauważyć, że dla najczęściej stosowanej wartości Z_x , nieprzekraczającej 20Ω , błąd względny popełniany przy pomiarze udarowym z połączonymi uziemieniami sąsiednich słupów utrzymuje się na poziomie 5%.

Przedstawiona procedura pomiaru uziemień słupów linii elektroenergetycznych z przewodami odgromowymi, bez odłączania przewodów uziemiających od konstrukcji słupa, umożliwia tego typu prace kontrolno-pomiarowe bez wyłączenia linii. Ponadto pomiary udarowe bez rozłączania zacisków kontrolnych uwzględniają wpływ fundamentu słupa, który również bierze udział w odprowadzaniu rzeczywistych prądów piorunowych, a którego rezystancja jest często porównywalna z rezystancją dodatkowego uziomu sztucznego, i nie powinien być pomijany w ocenie skuteczności uziemienia.

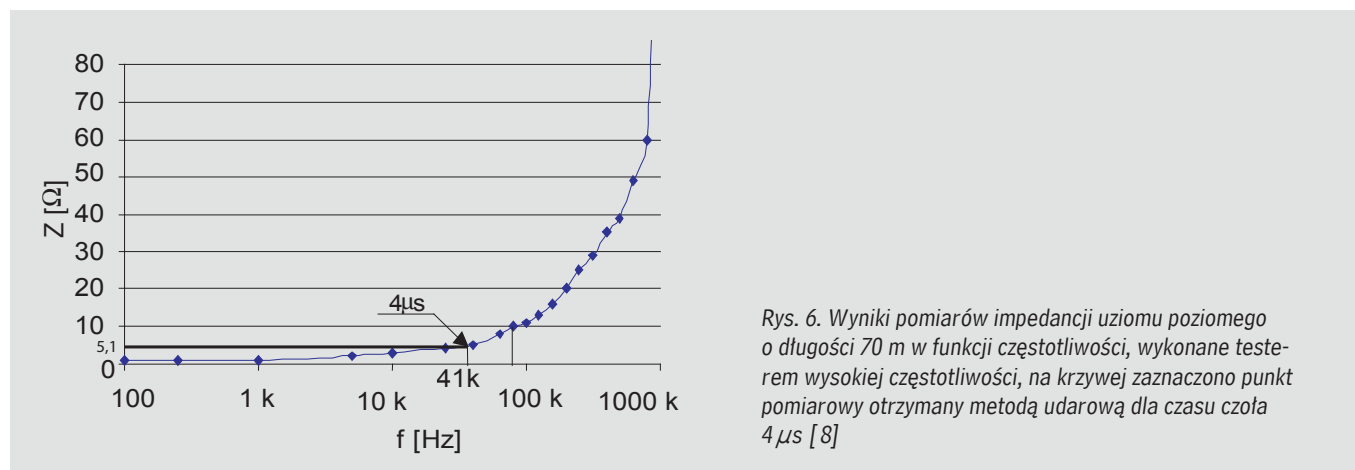


Rys. 5. Błąd względny pomiaru w funkcji wartości mierzonej Z_x na podstawie wyrażenia (2)

3.2. Porównanie miernika wysokoczęstotliwościowego i udarowego

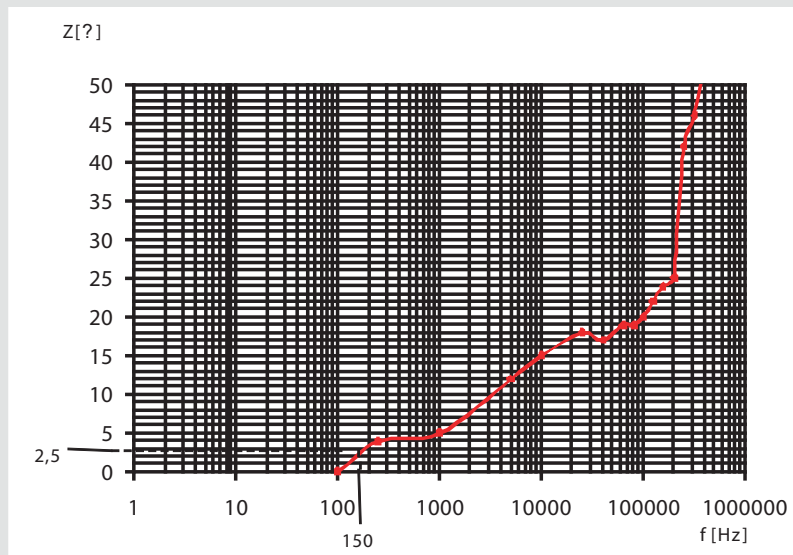
Podstawowe zalecenia dotyczące pomiarów instalacji uziemiającej słupów są zawarte w załączniku N normy PN-E 05115: 2001, oznaczonym jako informacyjny [3]. Według tej normy „Do pomiaru rezystancji oraz impedancji uziemienia można stosować różne metody. Wybór odpowiedniej metody zależy od rozległości układu uziemiającego i stopnia występowania zakłóceń”. Do pomiaru rezystancji uziemienia zalecany jest tester uziemień o częstotliwości napięcia pomiarowego nieprzekraczającej 150 Hz z wykorzystaniem sondy prądowej i napięciowej. W przypadku przyłączenia do systemu przewodów odgromowych linii elektroenergetycznych, wszystkie uziemienia słupów mają wpływ na otrzymany wynik. Dla takich rozległych systemów omawiana norma dopuszcza każdy dowolny sposób pomiaru, który jest użyteczny w danych warunkach. W przytoczonych przykładach jest wymieniony tester uziemień wysokiej częstotliwości, aby uniknąć konieczności wyłączenia linii i odłączania uziemień od konstrukcji słupów. Częstotliwość pomiarowa powinna być odpowiednio wysoka, aby impedancja przewodów odgromowych do sąsiednich słupów była na tyle duża, aby tę drogę przepływu prądu pomiarowego można było pominąć. W takim przypadku zamiast miernika z wymuszeniem wysokoczęstotliwościowym można postąpić się miernikiem generującym udary o odpowiednim czasie czoła. Na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów porównawczych impedancji uziomu poziomego o długości 70 m, wykonane za pomocą metody udarowej i metody wysokiej częstotliwości. W pomiarach zostały zastosowane udary o czasie czoła 4 μ s. Rezultaty otrzymane obiema metodami są porównywalne i wskazują na wzrost impedancji uziomu w stosunku do jego rezystancji otrzymanej metodą statyczną [6].

W polskiej praktyce pomiarowej rezystancję uziemień słupów mierzy się metodą udarową bez rozłączania zacisków kontrolnych [8, 11]. Amplituda prądowego udaru pomiarowego wynosi ok. 1 A. W przypadku testerów wysokiej częstotliwości prąd pomiarowy jest na poziomie miliamperów, co może czynić takie pomiary mało odpornymi na zakłócenia od prądów błądzących i prądów indukowanych przez pola elektromagnetyczne linii.



Rys. 6. Wyniki pomiarów impedancji uziomu poziomego o długości 70 m w funkcji częstotliwości, wykonane testerem wysokiej częstotliwości, na krzywej zaznaczono punkt pomiarowy otrzymany metodą udarową dla czasu czoła 4 μ s [8]

Potwierdzeniem tych obaw są wyniki pomiaru uziemienia słupa linii 400 kV otrzymane obiema metodami. Słup był posadowiony w gruncie o małej rezystywności i wartość 2,5 Ω uzyskana metodą udarową jest uzasadniona. Na krzywej $Z = f(f)$ uzyskanej testerem wysokiej częstotliwości przedstawionej na rys. 7 są widoczne wyraźne wpływy zakłóceń zewnętrznych (pole, prądy w uziemieniu), które zawyżają wyniki impedancji. Wartości zbliżone do wyników udarowych zostały otrzymane dla bardzo niskich częstotliwości, ok. 150 Hz. Taki zakres częstotliwości należy do pomiarów uważanych za prowadzone metodą statyczną i wtedy rezystancja uziemienia odnosi się do równoległego połączenia wszystkich słupów, a więc powinna osiągnąć wartość na poziomie 1 Ω . Brak wpływu uziemień sąsiednich powinien być osiągnięty dla częstotliwości kilkudziesięciu kiloherców, a dla takiego zakresu częstotliwości miernik wskazuje wartość impedancji uziemienia na poziomie 20 Ω , co jest wynikiem zdecydowanie zbyt wysokim. Zauważone różnice zostały wywołane zakłóceniami zewnętrznymi, których źródłem jest pracująca linia WN. Mierniki udarowe, ze względu na znacznie wyższą amplitudę prądu pomiarowego, są znacznie bardziej odporne na takie zakłócenia.



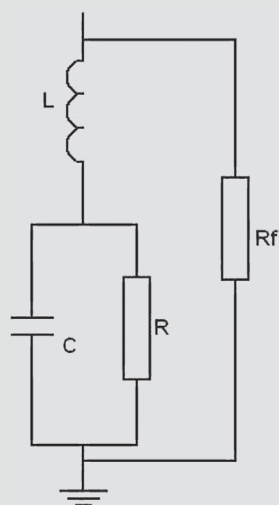
Rys. 7. Wyniki pomiarów impedancji uziemienia słupa linii 400 kV w funkcji częstotliwości, linią przerywaną zaznaczono wartość $2,5 \Omega$ uzyskaną metodą udarową o czasie udaru $4 \mu\text{s}$

4. WYNIKI BADAŃ

Przedmiotem badań był wpływ czasu czoła udaru oraz długości pręseł na otrzymywane wartości impedancji uziemień słupów linii elektroenergetycznych zaopatrzonych w przewody odgromowe. Badania zostały przeprowadzone zarówno z wykorzystaniem symulacji komputerowych, jak również poprzez pomiary na rzeczywistych uziemieniach słupów.

4.1. Symulacje komputerowe

Obliczenia na podstawie symulacji komputerowych przeprowadzono przy użyciu programu Matlab z wykorzystaniem pakietu Simulink. Uziom słupa składa się ze sztucznego uziomu otokowego oraz uziomu fundamentowego połączonych równolegle. Uziom otokowy został zamodelowany z wykorzystaniem elementów R , L oraz C , które wyznaczono zgodnie z metodyką opracowaną przez R. Verma [12]. Fundament jest zamodelowany przez rezystancję R_f obliczoną na podstawie wymiarów stopy fundamentowej. Całkowity model zastępczy uziomu przedstawia rys. 8.

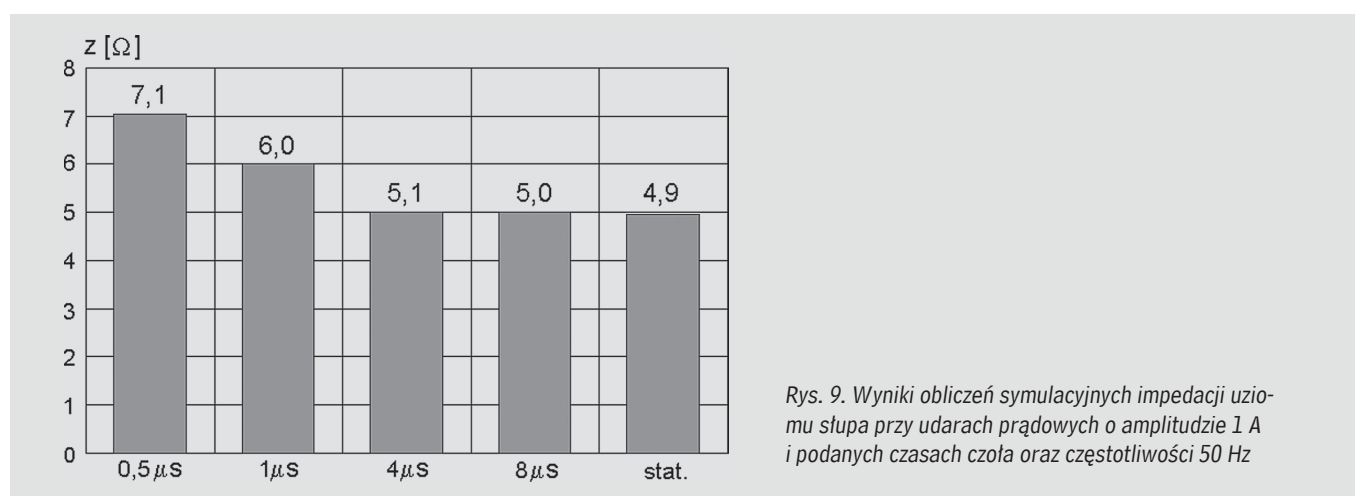


Rys. 8. Model zastępczy uziomu otokowego (R , L , C) wraz z fundamentem (R_f)

Parametry uziomu otokowego kwadratowego o boku 12 m i stopy fundamentowej o objętości $0,9 \text{ m}^3$ zostały wyznaczone dla założonej rezystywności gruntu $200 \Omega\text{m}$. Impedancję tak zamodelowanego uziomu wyznaczano przy prądzie udarowym o amplitudzie 1 A i czasach czoła równych 0,5; 1,0; 4,0 i 8,0 μs oraz przy prądzie przemiennym o częstotliwości sieciowej. Wyniki symulacji zostały przedstawione na rys. 9. Ze wzrostem czasu czoła maleje wartość impedancji uziomu, ale już przy czasie 4 μs jej wartość osiąga stan zbliżony do ustalonego,

otrzymanego dla częstotliwości sieciowej, który wynika przede wszystkim z obecności elementów o charakterze rezystancyjnym.

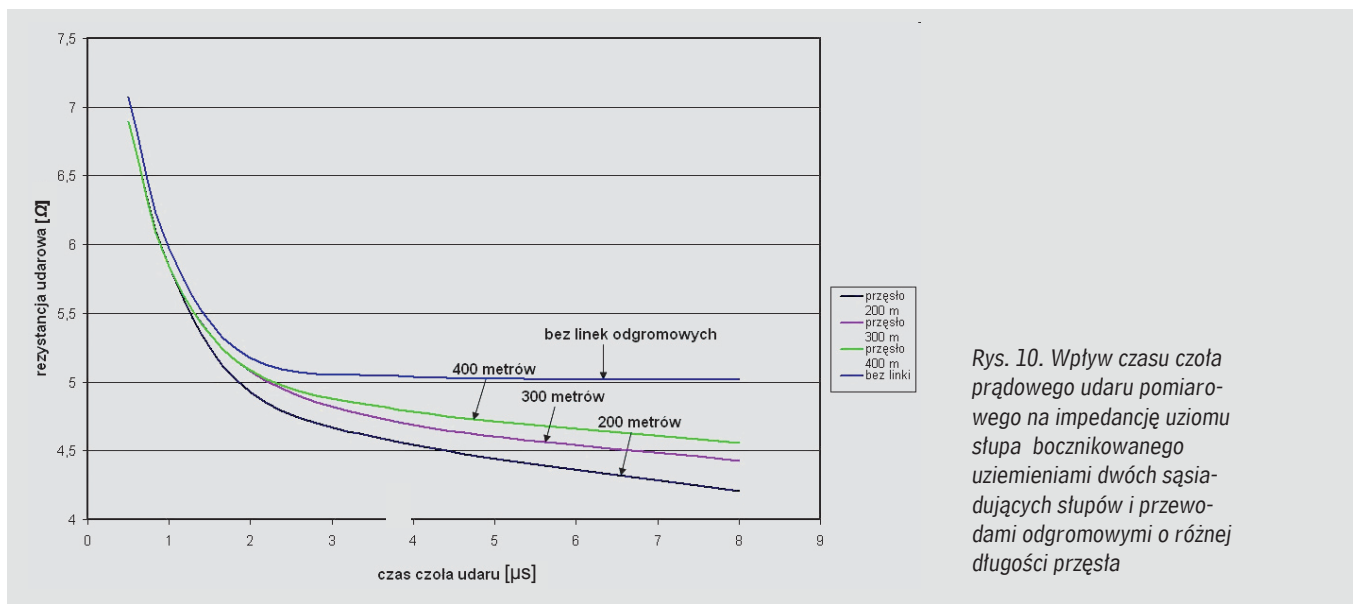
W kolejnym etapie obliczeń w programie Matlab analizowane uziemień słupa było boczniowane przez analogiczne 2 uziemień, połączone przewodem odgromowym o konfiguracji pokazanej na rys. 4. Impedancja falowa w układzie przewód odgromowy – ziemia została zamodelowana jako linia długa z uwzględnieniem parametrów o stałych rozłożonych. Przyjmowano długość pręseł równą 200, 300 i 400 m. Impedancja falowa słupów została pominięta, ponieważ przy zastosowanych długościach czoła uderów następują wielokrotne odbicia fal na krańcach słupów, co redukuje ich wpływ na przebiegi wypadkowe w analizowanym układzie połączeń. Wyniki pomiarów symulacyjnych impedancji udarowej między zaciskami 1 oraz 2 na rys. 4 w funkcji długości czoła uderów dla przyjętych długości pręseł zostały przedstawione na rys. 10. Krzywa oznaczona opisem „bez linek odgromowych” odpowiada wynikom pokazanym na rys. 10 i pokazuje, w jaki sposób maleje impedancja zamodelowanego uziemień słupa ze wzrostem długości czoła udaru pomiarowego. Kolejne krzywe przedstawiają wpływ równoległego połączenia uziemień sąsiednich słupów na otrzymane wyniki, a ich odchylenie od krzywej wyjściowej (bez linek) jest miarą popełnianego błędu przy pomiarze bez izolowania przewodów odgromowych na szczycie słupa. Błędy wywołane boczniowaniem uziemień rosną w miarę skracania długości pręseł i wydłużania czasu czoła udaru pomiarowego, jak to można zauważyć na rys. 10.



Rys. 9. Wyniki obliczeń symulacyjnych impedancji uziemień słupa przy uderach prądowych o amplitudzie 1 A i podanych czasach czoła oraz częstotliwości 50 Hz

W dotychczasowej polskiej praktyce pomiaru uziemień słupów linii elektroenergetycznych stosuje się czasy czoła uderów 1 oraz 4 μs jako wartości przewidziane w normie PN 04060:1992 [4]. W przypadku uderów o czasie czoła 1 μs obniżenie wartości mierzonej impedancji uziemień spowodowane boczniującym wpływem uziemień sąsiednich jest najmniejsze i nie przekracza poziomu 2–3%. Należy jednak zauważyć, że sama wartość impedancji udarowej przy tak krótkim czasie czoła znacznie przekracza rezystancję uziemień mierzoną w warunkach statycznych, która najczęściej stanowi punkt odniesienia w ocenie uziemień. Współczynnik udaru uziemień słupa definiowany jako stosunek impedancji udarowej do rezystancji statycznej, w przypadku udaru o czasie czoła 1 μs, może osiągać znaczne wartości, najczęściej zawarte w granicach 1,2–2,5. Wyższe wartości dotyczą uziemień słupów posadowionych w gruntach o znacznej rezystywności, w których zachodzi konieczność stosowania rozbudowanych uziemień sztucznych [7, 10]. W takich przypadkach impedancja uziemień słupa mierzona udarem o czasie czoła 1 μs może zbyt często przekraczać wartości normatywne podawane dla warunków statycznych.



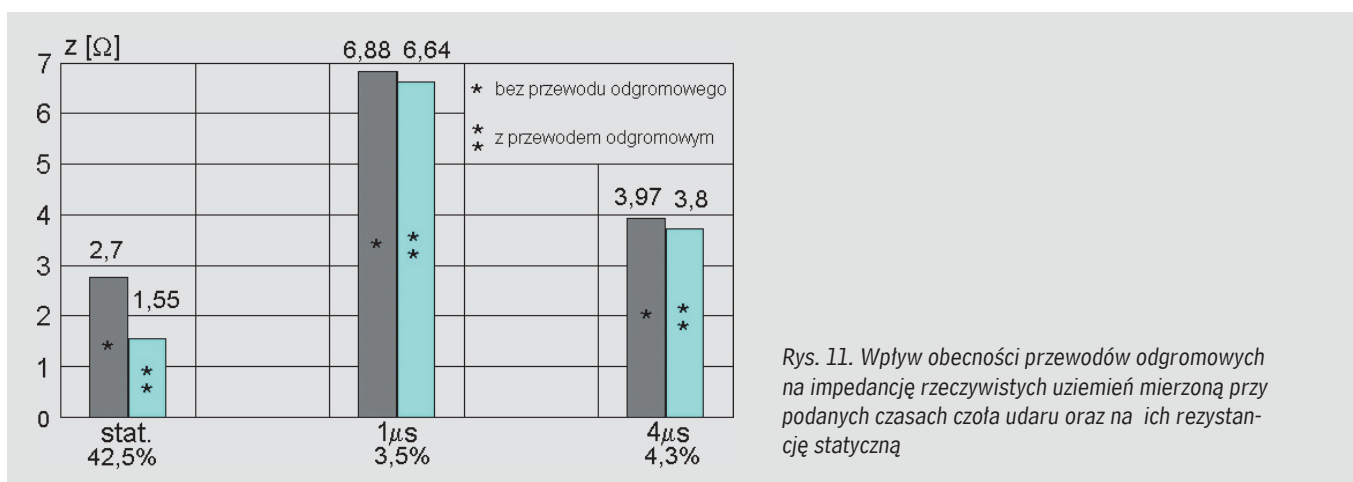


Rys. 10. Wpływ czasu czoła prądowego udaru pomiarowego na impedancję uziomu słupa bocznikowanego uziemieniami dwóch sąsiadujących słupów i przewodami odgromowymi o różnej długości przęsła

Pomiary uziemień słupów udarami o czasie czoła $4 \mu\text{s}$ mogą być przy krótkich przęsłach obarczone pewnym błędem, wskutek bocznikowania sąsiednimi uziemieniami, który nawet w niekorzystnych przypadkach nie przekracza 10%. Współczynnik udaru uziemień słupów mierzony przy udarach $4 \mu\text{s}$ jest niezbyt wysoki i z reguły nie przewyższa wartości 1,5. Większa wartość pomierzonej impedancji w porównaniu z rezystancją statyczną jest częściowo kompensowana przez kilkuprocentowy błąd obniżający wprowadzany przez bocznikowanie sąsiednimi uziemieniami, więc wyniki otrzymane przy pomiarach udarowych bez izolowania uziemień od przewodów odgromowych mogą być z dobrym przybliżeniem odnoszone do wymagań stawianych rezystancji statycznej uziemień.

4.2. Pomiary rzeczywistych uziemień słupów

Opisane w poprzednim podrozdziale obliczenia symulacyjne wpływu bocznikującego uziemień sąsiednich słupów na wyniki pomiarów zostały zweryfikowane badaniami przeprowadzonymi na rzeczywistej linii elektroenergetycznej. Badania przeprowadzono na siedmiu słupach należących do dwóch linii o napięciu 110 kV, a program badań obejmował pomiar impedancji udarowej przy czasach czoła udarów 1 i $4 \mu\text{s}$ oraz rezystancji statycznej. Pomiary przeprowadzono przy zwartych zaciskach kontrolnych łączących uziom sztuczny z konstrukcją słupa w dwóch konfiguracjach połączeń: bez przewodów odgromowych oraz z przewodami umocowanymi na wierzchołku badanego słupa. Średnie wartości otrzymanych impedancji oraz rezystancji zostały przedstawione na rys. 11. Błędy procentowe wynikające z bocznikowania mierzonych uziemień przez uziemienia sąsiednich słupów zostały zaznaczone w dolnej części rysunku. Największy błąd, przekraczający 40%, zaobserwowano przy pomiarach statycznych i to potwierdza, że metoda statyczna nie może być stosowana do pomiarów uziemień słupów bez rozłączania zacisków kontrolnych lub izolowania przewodów odgromowych od konstrukcji słupa. Znacznie mniejsze błędy wystąpiły podczas pomiarów metodą udarową: przy udarach o czasie czoła $1 \mu\text{s}$ średni błąd wynosił 3,5%, a przy udarach $4 \mu\text{s}$ – 4,3%. Obniżenie otrzymanych wartości uziemień z powodu bocznikowania uziemieniami sąsiednich słupów nie przekracza wartości błędów uzyskanych z symulacji komputerowych i przedstawionych na rys. 5 i 10.



Rys. 11. Wpływ obecności przewodów odgromowych na impedancję rzeczywistych uziemień mierzoną przy podanych czasach czoła udaru oraz na ich rezystancję statyczną

5. WNIOSKI

W rozpraszaniu prądu słupa w ziemi bierze udział sztuczny uziom oraz fundamenty tego słupa. W związku z tym ocena rezystancji uziemienia słupa linii elektroenergetycznej powinna odbywać się przy równoległym połączeniu obu elementów składowych uziemienia. Pomiar przy użyciu mierników niskiej częstotliwości z rozłączeniem zacisków kontrolnych od konstrukcji słupa nie spełnia wspomnianego wyżej warunku, ponadto wymaga wyłączenia linii na czas pomiarów. Istnieją wprawdzie metody pomiarów przy niskiej częstotliwości z wykorzystaniem mierników cęgowych, które pozwalają na ocenę kompletnego uziemienia słupa bez rozłączania zacisków kontrolnych, ale metody te są dość uciążliwe ze względu na konieczność analizy prądu płynącego do ziemi przez każdą z czterech nóg słupa oraz z powodu dość niskiej dokładności takich pomiarów.

Zastosowanie metod z przebiegami szybkozmiennymi (mierniki udarowe lub wysokiej częstotliwości) pozwala na pomiary uziemień bez rozłączania zacisków kontrolnych od konstrukcji słupa, ponieważ uziemienia sąsiednich słupów linii są połączone równolegle z badanym uziemieniem poprzez przewody odgromowe, których impedancja w przypadku szybkozmiennych przebiegów rośnie do wartości impedancji falowej w układzie przewód – ziemia. W praktyce pomiarów uziemień słupów linii wysokich napięć stosowane są mierniki udarowe, ze względu na zbyt dużą podatność na zakłócenia mierników pracujących przy wysokiej częstotliwości. Prąd pomiarowy mierników wysokiej częstotliwości jest na poziomie miliamperów i ich praca jest zakłócana napięciami indukowanymi w obwodach pomiarowych przez pole elektromagnetyczne pod linią oraz prądami błądzącymi. Mierniki udarowe pracują przy prądach na poziomie ampera, co czyni je znacznie bardziej odpornymi na tego typu zakłócenia.

Równoległe połączenie uziemień poszczególnych słupów linii obniża w niewielkim stopniu wartość impedancji mierzonej także metodą udarową. Różnica między wartością rzeczywistą i wartością mierzoną impedancji uziemienia słupa rośnie w miarę wydłużania czasu czoła udaru, a maleje wraz ze wzrostem długości przeseł linii. Zaproponowany 4 μ s czas czoła udaru stanowi kompromis między wymaganiem dokładności pomiaru a otrzymywanymi wartościami impedancji, odniesionymi do rezystancji uziemienia przytaczanej w przepisach normalizacyjnych. Błąd teoretyczny popełniany podczas stosowania proponowanej metody udarowej pomiarów nawet w najbardziej niekorzystnych warunkach nie przekracza 10%, co w badaniach uziemień jest poziomem do zaakceptowania.

Przeprowadzone obliczenia i symulacje komputerowe zostały potwierdzone wynikami pomiarów przeprowadzonymi na rzeczywistych uziemieniach słupów linii 110 kV. Badania te wskazują, że błąd wprowadzany przez bocznikujący wpływ uziemień pozostałych słupów w warunkach rzeczywistych jest mniejszy niż wynikający z obliczeń teoretycznych i nie przekracza 5%.

BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 62305-1:2008 – Ochrona odgromowa, część 1, Zasady ogólne.
2. PN-EN 62305-3:2009 – Ochrona odgromowa, część 3, Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia.
3. PN-E 05115:2002 – Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.
4. PN-E 04060:1992 – Wysokonapięciowa technika probiercza. Ogólne określenia i wymagania probiercze.
5. Ustawa Prawo budowlane, 1994 rok, tekst jednolity: Dz. U. 2006, Nr 156, poz. 1118.
6. Wojtas S., Ocena uziemień odgromowych metodami: udarową i wysokoczęstotliwościową, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, vol. 53, nr 4, 2007.
7. Wojtas S., Wołoszyk M., Galewski M., Rezystancja udarowa uziemień obiektów budowlanych, *Elektrosystemy*, nr 4, 2004.
8. Wołoszyk M., Pomiary impedancji (rezystancji) udarowej uziemień odgromowych, [w:] Gryzewski Z., *Prace pomiarowo-kontrolne przy urządzeniach elektroenergetycznych o napięciu do 1 kV*, COSiW SEP, Warszawa 2002.
9. Szpor S., Samuła J., *Ochrona Odgromowa, WN-T*, Warszawa 1983.
10. Wołoszyk M., Wojtas S., Galewski M., Badania udarowe uziemień słupów linii elektroenergetycznych, *Elektrosystemy*, nr 11, 2006.
11. Wojtas S., Impulse measurement accuracy of transmission line earthings, [w:] 29th International Conference on Lightning Protection ICLP2008, 23rd–26th June 2008, Uppsala 2008.
12. Verma R., Mukhedar D., Fundamental considerations and impulse impedance of grounding grids, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no 3, 1981.