

doi:10.15199/48.2015.10.38

Wpływ komutacyjnych załamań napięcia na dokładność pomiaru impedancji uziemienia metodą podharmoniczną

Streszczenie. Wyznaczanie impedancji uziemienia metodą podharmoniczną umożliwia uzyskanie dobrej dokładności pomiaru nawet w obecności silnych zakłóceń występujących w gruncie. Metoda ta charakteryzuje się znaczną odpornością na sygnały zakłócające o częstotliwości sieciowej jak również stałoprądowe. W artykule zaprezentowano wyniki badań nad wpływem zakłóceń wynikających z komutacyjnych załamań napięcia sieci na dokładność wyznaczania impedancji uziemienia metodą podharmoniczną.

Abstract. Determination of impedance earthing by subharmonic method allows for good accuracy even in the presence of strong interference occurring in the soil. This method is characterized by substantial resistance to spurious signals with the mains and DC frequency. The paper presents results of research on the effects of disruption resulting from the commutation voltage notches on the accuracy of determining the impedance grounding with the subharmonic method. (**The impact of voltage notches on accuracy of earth impedance measurement by subharmonic method.**)

Słowa kluczowe: impedancja (rezystancja) uziemienia, metoda podharmoniczna, zakłócenia, załamania napięcia.

Keywords: earthing impedance (resistance), subharmonic method, interferences, voltage notches.

Wstęp

W wielu obiektach energetycznych i przemysłowych jako jeden z elementów ochrony przeciwporażeniowej stosuje się instalację uziemiającą. Parametry takiej instalacji należy regularnie kontrolować, gdyż tylko sprawne uziemienie może zapewnić bezpieczne warunki pracy obsługi oraz wielu urządzeń elektrycznych i elektronicznych.

Podstawowym parametrem uziemienia jest zazwyczaj jego rezystancja wyznaczana przy niskiej częstotliwości. Rezystancja wystarczająco charakteryzuje większość uziemień ochronnych i roboczych, których zadaniem jest odprowadzanie do gruntu prądów o częstotliwości sieciowej. Wartość takiej rezystancji wynosi zwykle kilka omów.

W dużych obiektach często mamy do czynienia z uziemieniami rozległymi, dla których znaczenia nabiera składowa reaktancyjna. Znaczenie długości elementów umieszczonych w gruncie powodują wzrost wartości reaktancji uziemienia przy jednoczesnym spadku jego rezystancji. Dla obiektów, w których podstawowym parametrem charakteryzującym jakość uziemienia jest jego impedancja, wartość modułu tej impedancji nie przekracza zwykle $0,5 \Omega$ [1]. Niekiedy wartość argumentu takiej impedancji może nawet osiągać wartości rzędu 30° [2].

Pomiary rezystancji lub impedancji uziemienia narażają czasami wielu problemów. Bywa to związane z niedostateczną znajomością podziemnej części instalacji lub też ze zmiennością jej parametrów wywołowaną zmianami warunków panujących w glebie. Jednym z najważniejszych problemów jest jednak występowanie sygnałów zakłócających spowodowanych przepływem w gruncie prądów błądzących. Dotyczy to głównie obiektów energetycznych oraz obszarów silnie zindustrializowanych, szczególnie tam gdzie stosowane są prostowniki sterowane dużej mocy. Na przykład w podstacjach energetycznych prądy powrotne występujące w gruncie mają zwykle wartości rzędu kilku amperów i powodują występowanie napięć zakłócających o wartościach 5-10 V. Czasami jednak prąd powrotny może osiągać wartość nawet 15 A [3]. Na obszarach uprzemysłowionych dodatkowo mogą występować zakłócenia o charakterze impulsowym [4, 5].

Większość obecnie stosowanych mierników uziemień wykorzystuje do pomiaru metodę techniczną. Mierzona wartość rezystancji lub impedancji uziemienia wyznacza się w nich na podstawie pomiaru wartości prądu generowanego

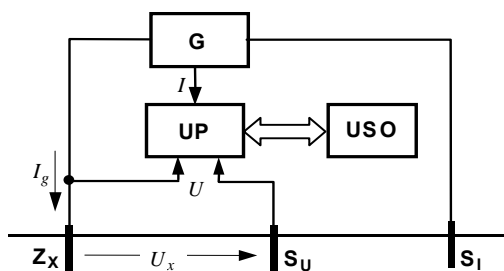
w mierniku oraz wartości spadku napięcia jaki przepływ tego prądu wywołuje na badanym uziemieniu. Prądy pomiarowe stosowane w zdecydowanej większości mierników uziemień nie przekraczają wartości 250-300 mA co oznacza, że sygnały zakłócające występujące w gruncie mogą być nawet kilkukrotnie większe od wartości sygnałów pomiarowych.

Od wielu lat, w różnych ośrodkach naukowych trwały prace nad metodami ograniczającymi wpływ różnego typu zakłóceń na dokładność pomiarów parametrów uziemień. Prezentowane były różne podejścia do problemu. Wykorzystywano rozwiązania układowe lub zaawansowaną obróbkę sygnałów [2, 4], a także stosowano specyficzne sygnały pomiarowe [6, 7]. W ramach tego nurtu w Politechnice Gdańskiej opracowano metodę „podharmoniczną” do pomiaru rezystancji lub impedancji uziemienia w obecności silnych sygnałów zakłócających [8].

Wyznaczanie impedancji uziemienia metodą podharmoniczną

W omawianej metodzie wykorzystuje się prąd pomiarowy o częstotliwości stanowiącej podharmoniczną częstotliwości sieci. Do wyznaczania wartości prądu oraz spadku napięcia na badanym uziemieniu wykorzystano metodę szczególnego próbkowania, która pozwala na selektywne wyznaczenie harmonicznej podstawowej sygnału odkształconego przy jednoczesnej eliminacji składowej stałej oraz wszystkich harmonicznych parzystych przebiegu badanego [9]. Stosując tą metodę należy wymusić przepływ przez badane uziemienie prądu o częstotliwości 25 Hz stanowiącej podharmoniczną częstotliwości sieci. Zakłócenia o częstotliwości 50 Hz oraz ich wyższe harmoniczne stają się w takim przypadku harmonicznymi parzystymi sygnału pomiarowego i dzięki temu są bardzo skutecznie eliminowane przez metodę szczególnego próbkowania.

Pomiar impedancji uziemienia opisywaną metodą można zrealizować w układzie pokazanym na rysunku 1. W generatorze G formowany jest sygnał, który powoduje przepływ prądu pomiarowego I_g w obwodzie składającym się z uziemienia Z_x oraz sondy prądowej S_i . Wartości prądu oraz spadku napięcia na uziemieniu badanym wyznaczane są w układzie pomiarowym UP współpracującym z układem sterująco-obliczeniowym USO. Spadek napięcia na uziemieniu Z_x wyznaczany jest w odniesieniu do strefy ustalonego potencjału, w której umieszczona jest sonda napięciowa S_u .



Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy układu do pomiaru impedancji uziemienia

W przypadku idealnym prąd generowany powinien być sinusoidalny, a wówczas jego wartość chwilową opisuje zależność

$$(1) \quad i_g(t) = I_1 \cdot \sin \omega t \quad \text{przy czym} \quad \omega t = 2\pi \cdot \frac{t}{T_g}$$

gdzie: I_1 – amplituda harmonicznej podstawowej prądu generowanego, T_g – okres prądu generowanego.

Prąd I_g przepływając przez badane uziemienie wywołuje na jego impedancji Z_x spadek napięcia o wartości chwilowej

$$(2) \quad u_g(t) = U_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha_1)$$

gdzie: α_1 - przesunięcie fazowe w stosunku do składowej podstawowej prądu generowanego i_g .

Na obszarze pomiędzy uziemieniem badanym a sondą napięciową mogą równocześnie pojawiać się zakłócające spadki napięcia u_z wywołane przepływem prądów błędnych o częstotliwości sieciowej wraz z jej wyższymi harmonicznymi. W pobliżu urządzeń trakcyjnych mogą się również pojawiać w gruncie prądy stałe. Napięcia zakłócające będą się wówczas dodawały do napięcia wywołanego przepływem prądu I_g . Dla prądu generowanego o częstotliwości 25 Hz, będącej pierwszą podharmoniczną częstotliwości sieci, całkowity spadek napięcia między uziemieniem badanym a sondą napięciową opisuje zależność

$$(3) \quad u_x(t) = u_g(t) + u_z(t) = U_0 + U_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{k=1} U_{2k} \cdot \sin(2k\omega t + \alpha_{2k})$$

gdzie: k - numer porządkowy harmonicznej przebiegu zakłócającego w odniesieniu do częstotliwości sieci, $(2k)$ - numer porządkowy harmonicznej przebiegu zakłócającego w odniesieniu do częstotliwości prądu I_g , U_0 - składowa stała przebiegu zakłócającego, U_{2k} - amplitudy kolejnych harmonicznych przebiegu zakłócającego, α_{2k} - przesunięcie fazowe kolejnych harmonicznych napięcia zakłócającego.

W wybranych chwilach czasowych z sygnału u_x pobierane są próbki, z których następnie zgodnie z zasadami metod szczególnego próbkowania [8, 9] wyznacza się dwie składowe spadku napięcia na uziemieniu: U_{1Re} zgodną ze składową podstawową prądu generowanego I_g oraz U_{1Im} - ortogonalną do tego prądu. Analogicznie wyznaczana jest wartość harmonicznej podstawowej I_1 prądu płynącego przez badane uziemienie.

Wartość mierzony impedancji uziemienia Z_x jest wyznaczana z zależności uwzględniającej fakt, iż częstotliwość prądu, pomiarowego jest dwukrotnie mniejsza od częstotliwości sieci, przy której uziemienie ma spełniać swoje zadanie

$$(4) \quad Z_x = \frac{1}{I_1} \cdot \sqrt{U_{1Re}^2 + 4 \cdot U_{1Im}^2}$$

Rezystancję uziemienia R_x określa zależność

$$(5) \quad R_x = \frac{U_{1Re}}{I_1}$$

Określony w powyższy sposób wynik pomiaru impedancji lub rezystancji uziemienia jest wolny od wpływu sygnałów zakłócających stałych oraz zmiennych o częstotliwości sieciowej wraz z jej wyższymi harmonicznymi.

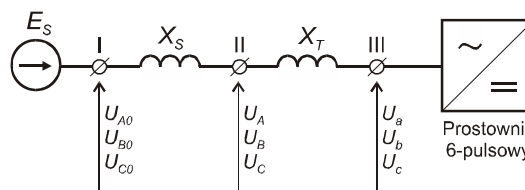
Komutacyjne załamania napięcia w sieci

Metoda podharmonicznej wykazuje dużą odporność nie tylko na zakłócenia stałe i przemienne. Odchylenia częstotliwości występujące w sieci oraz zakłócenia o charakterze dynamicznym również mają niewielki wpływ na dokładność pomiarów [10]. Autorzy podjęli zagadnienie sprawdzenia wrażliwości metody na zakłócenia powodowane krótkotrwałymi załamaniami napięcia występującymi na obszarach przemysłowych, gdzie powszechnie stosowane są przekształtniki tyrystorowe dużej mocy. Istniało podejrzenie, że tego typu zakłócenia w związku ze specyficznym sposobem pobierania próbek mogą powodować powstawanie znacznych błędów.

Komutacyjne załamania napięcia sieci występują w czasie przejmowania prądu pomiędzy zaworami przekształtnika. Ze względu na indukcyjności występujące w obwodzie i warunek ciągłości prądów, przekazywanie tego prądu zachodzi w czasie różnym od zera. Prowadzi to do krótkich stanów zwarciovych komutujących faz [11, 12]. Oddziaływanie tego zjawiska na sieć jest uzależnione od stosunku mocy zwarciovych sieci do mocy zwarciovych transformatora przekształtnikowego.

Załamania napięcia są charakteryzowane przez parametry takie jak głębokość załamania Δu oraz czas trwania załamania. Niekiedy załamanie opisuje się iloczynem tych dwóch parametrów. W rzeczywistości na załamania często nakładają się również krótkotrwałe zmiany oscylacyjne [13].

Mechanizm powstawania załamań napięcia został pokazany na przykładzie obwodu przedstawionego na rysunku 2. W przykładzie tym przekształtnik sterowany 6-pulsowy jest zasilany z sieci o reaktancji X_S i transformatora przekształtnikowego o reaktancji X_T .

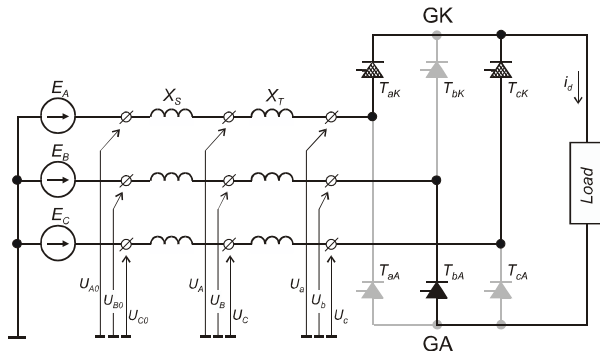


Rys. 2. Uproszczony schemat zasilania prostownika sterowanego 6-pulsowego

Największe załamania napięcia występują po stronie wtórnej transformatora przekształtnikowego (w punkcie III na rysunku 2). W miarę oddalania od zacisków przekształtnika wartość chwilowa napięć dąży do wartości źródłowych E_S (w punkcie I na rysunku 2) i głębokość załamań komutacyjnych maleje [11].

Dla przedstawienia mechanizmu powstawania załamań napięcia wzięto pod uwagę napięcie fazowe U_a . W fazie tej występują cztery załamania napięcia na okres, w momentach przejmowania prądu i_d pomiędzy fazą a

i fazami *b* i *c*. Przejmowanie prądu odbywa się za pośrednictwem zaworów T_{aK} , T_{bK} , T_{cK} grupy katodowej prostownika 6-pulsowego oraz zaworów T_{aA} , T_{bA} , T_{cA} grupy anodowej. Schemat zastępczy układu zasilania takiego przekształtnika został pokazany na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat zastępczy układu zasilania prostownika

Przykładowo w momencie przejmowania prądu i_d pomiędzy zaworami T_{aK} i T_{cK} napięcia U_a i U_c są równe i wynoszą $-0,5U_b$ [11]. W przypadku komutacji fazy *a* i *b* za pośrednictwem zaworów T_{aK} i T_{bK} napięcia U_a i U_b są równe i wynoszą $-0,5U_c$. Dodatkowe dwie komutacje fazy *a* występują przy przejmowaniu prądu wyprostowanego i_d przez zawory grupy anodowej.

Badania symulacyjne

W celu sprawdzenia wrażliwości metody podharmonicznej na zakłócenia wywołane komutacyjnymi załamaniami napięcia w sieci wykonano szereg badań symulacyjnych. Jako sygnał testowy przyjęto pokazany na rysunku 4 przebieg o kształcie odpowiadającym napięciu U_a . Zgodnie z opisanym wyżej mechanizmem powstawania załamań napięcia sygnał ten można opisać zależnością

$$(6) \quad u_z(t) = W_1(t) \cdot U_z \cdot \sin \omega t + \\ + W_2(t) \cdot (-0,5)U_z \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \\ + W_3(t) \cdot (-0,5)U_z \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

przy czym współczynniki $W_1(t)$, $W_2(t)$ oraz $W_3(t)$ przyjmują wartości 0 albo 1 zgodnie z warunkami:

$$W_2(t) = 1 \Leftrightarrow \{ \alpha_z + k\pi \leq \omega t < \alpha_z + \omega t_z + k\pi \}$$

$$W_3(t) = 1 \Leftrightarrow \{ \alpha_z + \frac{\pi}{3} + k\pi \leq \omega t < \alpha_z + \frac{\pi}{3} + \omega t_z + k\pi \}$$

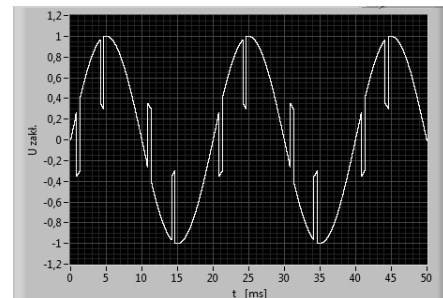
$$W_1(t) = 1 \Leftrightarrow \{ W_2(t) \neq 1 \wedge W_3(t) \neq 1 \}$$

gdzie: U_z – składowa podstawowa sygnału zakłócającego, t_z – czas trwania załamania, α_z – kąt zależny odysterowania tyrystora.

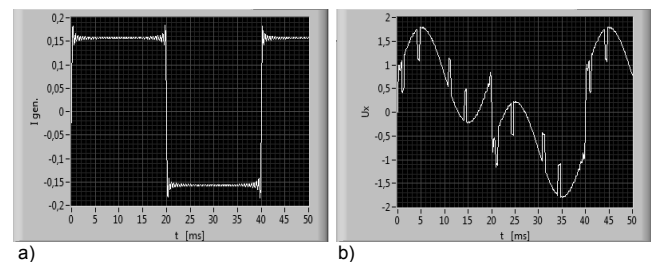
Dla uproszczenia przyjęto, że amplituda sygnału zakłócającego jest równa amplitudzie harmonicznej podstawowej sygnału pomiarowego (25 Hz). Kształt sygnału zakłócającego wytworzonego zgodnie z zależnością (6) pokazano na rysunku 4.

Wygenerowanie sinusoidalnego sygnału prądowego o częstotliwości 25 Hz jest trudne do osiągnięcia

w rzeczywistym mierniku. Do badań przyjęto więc łatwy do uzyskania w praktyce kształt prądu zbliżony do prostokątnego. Na rysunku 5 pokazano przykładowe przebiegi prądu I_g oraz sumarycznego sygnału mierzonego $U_x = I_g \cdot Z + U_z$ na uziemieniu o rezystancji $R = 5 \Omega$ oraz indukcyjności $L = 100 \mu H$.



Rys. 4. Kształt testowego sygnału zakłócającego

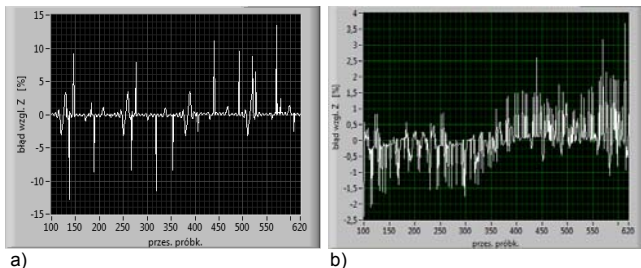


Rys. 5. Kształt generowanego prądu pomiarowego (a) oraz napięcia występującego między uziemieniem i sondą napięciową (b)

Uzyskanie częstotliwości stanowiącej dokładnie podharmoniczną sygnału zakłócającego może być również problematyczne. Przyjęto więc, że sygnał testowy ma częstotliwość 25 Hz natomiast sygnał zakłócający przybiera wartości rzeczywiście spotykane w sieciach europejskich. Pomimo, że normy dopuszczają odchyłki częstotliwości w sieci do 0,5 Hz a wyjątkowo nawet do 2 Hz to w rzeczywistości niezwykle rzadko przekraczają one wartość 0,05 Hz [14]. Do badań przyjęto odchyłkę $\mp 0,07$ Hz.

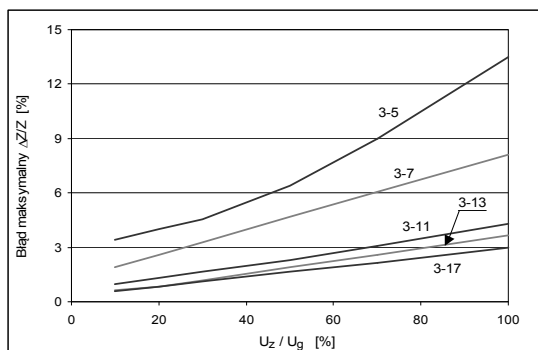
Szczególne próbkowanie wykorzystywane do filtracji zakłóceń w metodzie podharmonicznej usuwa składowe stałe oraz harmoniczne parzyste przebiegu testowego, a także (zależnie od ilości pobieranych próbek) wybrane harmoniczne nieparzyste. Ze względu na ograniczoną szybkość przetwornika A/C użytego w mierniku oraz odchylenie częstotliwości napięć zakłócających od wartości 50 Hz, niektóre próbki pobrane w czasie występowania załamania napięcia (w pobliżu jego zbroczy) mogą losowo przybierać wartości $U_z \cdot \sin \omega t$ albo $(-0,5)U_z \cdot \sin(\omega t \mp 2\pi/3)$ zgodnie z zależnością (6). W rezultacie wynik pomiaru impedancji uziemienia może być obciążony błędem. W ramach przeprowadzonych symulacji przebadano właściwości metody przy założeniu częstotliwości próbkowania osiągalnych dla przetworników A/C dostępnych w prostych mikrokontrolerach rzędu kilkunastu kHz. Wzięto pod uwagę kilka realizacji metody. Sprawdzano metodę 3..5 (eliminującą 3- i 5-tą harmoniczną przy pobieraniu 16 próbek), metodę 3..7 (32 próbki z eliminacją do 7-ej harmonicznej), 3..11 (64 próbki) 3..13 (128 próbek) i metodę 3..17 (256 próbek). Rejestrowano przy tym wartości maksymalne błędów wyznaczania impedancji uziemienia w zależności od chwili początkowej pobierania serii próbek przesuwanej co ok. $0,7^\circ$ w stosunku do przebiegu zakłócającego. Uzyskane wartości błędów dla dwóch realizacji metody (3-5 i 3-13) przedstawiono na

rysunku 6. Jak widać, zwiększenie liczby pobieranych próbek z 16 do 128 pozwala na wielokrotne zmniejszenie wartości błędów pomiarowych. Warto również zauważyć, że wartości błędów zbliżone do maksymalnych występują niezwykle rzadko. Na rysunku 6 występują one w mniej niż 10 przypadkach na serię 520 pomiarów. Pozwala to mieć nadzieję, że zastosowanie kilkukrotnego pomiaru automatycznego z wykorzystaniem podstawowej obróbki statystycznej pozwoli na istotne zmniejszenie błędów pomiarowych. Badania te przeprowadzono dla uziomu o rezystancji $R = 5 \Omega$ oraz indukcyjności $L = 100 \mu\text{H}$ oraz przy częstotliwości sieci $f = 50,04 \text{ Hz}$.

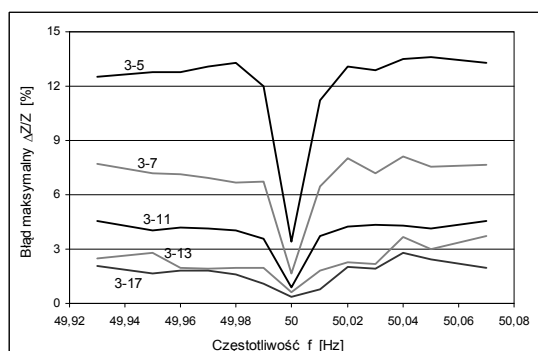


Rys. 6. Błędy wyznaczania impedancji uziemienia dla dwóch realizacji metody „3-5” (a) oraz „3-13” (b)

Jak można się było spodziewać wartości maksymalne błędów pomiarowych silnie zależały od wartości napięcia zakłócającego i to w sposób zbliżony do liniowego. Wykresy przedstawiające tę zależność pokazano na rysunku 7, przy czym amplitudę zakłóceń określono w procentach amplitudy sygnału generowanego. Nie stwierdzono natomiast zależności błędów od szerokości załamania napięcia.



Rys. 7. Błędy maksymalne wyznaczania impedancji uziemienia dla różnych realizacji metody w funkcji napięcia zakłócającego



Rys. 8. Błędy maksymalne wyznaczania impedancji uziemienia dla różnych realizacji metody w funkcji odchyłki częstotliwości

Zbadano również w jaki sposób na błędy wywołane załamaniem napięcia wpływa odchyłka częstotliwości sieci w odniesieniu do wartości znamionowej 50 Hz. Wyniki

zobrazowano na rysunku 8 przedstawiającym wartości maksymalne błędów w funkcji odchyłki częstotliwości dla różnych realizacji metody.

Okazało się, że błędy wyraźnie maleją dla częstotliwości bardzo bliskich wartości znamionowej, natomiast dla odchyłek przekraczających wartość 0,02 Hz błędy te są praktycznie stałe.

Wnioski

Pomiary rezystancji lub impedancji uziemień przy użyciu metody podharmonicznej umożliwiają uzyskanie dobrej dokładności przy zaangażowaniu bardzo prostych środków technicznych. Metoda ta wykazuje niewielką wrażliwość na typowe sygnały zakłócające występujące w środowisku przemysłowym w tym również na zakłócenia wywołane przez komutacyjne załamania napięcia. Dalszą poprawę dokładności pomiarów można uzyskać dzięki zastosowaniu kilkukrotnego pomiaru automatycznego oraz wykonaniu podstawowej obróbki statystycznej wyników.

LITERATURA

- [1] 81-1983 IEEE Std.: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System
- [2] Ziółko M., Ograniczenie wpływu odkształcenia napięcia sieci na dokładność pomiaru impedancji uziemień urządzeń elektroenergetycznych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), nr 2, 21-24
- [3] He, J., Zeng, R., Zhang, B., Methodology and Technology for Power System Grounding, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., Singapore (2012)
- [4] Zeng R., He J.L., Guan Z.C., Novel measurement system for grounding impedance of substation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21 (2006), no. 2, 719-725
- [5] Ming Z.F., Zhou M. C., Impact of Zero-Voltage Notches on Outputs of Soft-Switching Pulsewidth Modulation Converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (2011), no. 6, 2345-2354
- [6] Griffiths H., Jones P., Harid N., Haddad A., Proposal for measurement of earth impedance using variable frequency injection, *Measurement Science and Technology*, no 21 (2010), http://iopscience.iop.org/0957-0233/21/8/085102/pdf/mst10_8_085102.pdf (odczytano 17.07.2015)
- [7] Wojtas S., Lightning impulse efficiency of horizontal earthing, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 10b, 332-334
- [8] Wołoszyk M., Filtering of interference signals during measurements of grounding resistance using the subharmonic method. *Metrology and Measurement Systems*, 9 (2002), no. 4, 253-267
- [9] Sawicki J., Modification of Particular Sampling Method, *XIII IMEKO World Congress*, Torino, Italy, (1994)
- [10] Wołoszyk M., Błędy dynamiczne wyznaczania impedancji uziemienia metodą podharmonicznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 10b, 32-34
- [11] Borecki J., Stosur M., Szkółka S., *Energoelektronika – Podstawy i wybrane zastosowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2008)
- [12] Piróg S., *Energoelektronika. Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej*, AGH - Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, (2006)
- [13] Ghandehari R., Shoulaie A., Evaluating Voltage Notch Problems Arising from AC/DC Converter Operation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24 (2009), no. 9, 211-219
- [14] Musiał E., Ocena jakości energii elektrycznej w sieciach przemysłowych. *Automatyka-Elektryka-Zakłócenia*, nr 1/2010, 30 – 45 - <http://www.cire.pl/pliki/2/e-pismo-1-jakosc.pdf> (odczytano 16.07.2015)

Autorzy: dr inż. Marek Wołoszyk, dr inż. Michał Ziółko, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Metrologii i Systemów Informatycznych, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: marek.woloszyk@pg.gda.pl, michal.ziolko@pg.gda.pl