

**Marek WOŁOSZYK**

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI,  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

## Wpływ odchyleń częstotliwości sieci na dokładność pomiaru rezystancji uziemienia metodą podharmonicznej

Dr inż. Marek WOŁOSZYK

Uzyskał dyplom magistra inżyniera na Wydz. Elektrycznym Politechniki Gdańskiej w 1978r. w zakresie przetwarzania i użytkowania energii elektrycznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał na tym samym wydziale w 1988r. Obecnie pracuje jako starszy wykładowca w Katedrze Metrologii i Systemów Informatycznych Wydz. Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Główny kierunek działalności naukowej związany jest ze statycznymi i udarowymi metodami pomiarów uziemień.



e-mail: mawo@ely.pg.gda.pl

### Streszczenie

Istotnym czynnikiem wpływającym na dokładność pomiarów rezystancji lub impedancji uziemienia jest poziom zakłóceń wynikających z występowania w gruncie prądów błądzących o częstotliwości sieciowej. Dobrą dokładność pomiaru zapewnia wykorzystanie metody podharmonicznej, w której bardzo skutecznie usuwane są wpływy prądów błądzących pod warunkiem wytworzenie prądu pomiarowego o częstotliwości równej połowie częstotliwości zakłócającej. W artykule przedstawiono wyniki badań nad wpływem naturalnych odchyleń częstotliwości sieci na dokładność pomiaru parametrów uziemień metodą podharmonicznej.

**Słowa kluczowe:** rezystancja uziemienia, metoda podharmonicznej, częstotliwość zakłóceń.

### Impact of network frequency deviations on the accuracy of earthing impedance measurement by the subharmonic method

#### Abstract

Level of interferences caused by network frequency stray currents in the soil is a significant factor affecting the accuracy of measuring the earthing resistance and impedance. A proper accuracy of measurements of earthing parameters can be assured by using the subharmonic method. This easy-to-use method eliminates effectively the impact of interfering signals provided that a measurement current of the frequency equal to a half of the interfering frequency is used. Both natural deviations existing in the network and generating the measurement current of a frequency to some extent differing from the assumed value of 25 Hz causes that the basic assumption of the subharmonic method is not met. This paper presents the results of research on the impact of frequency deviations on the accuracy of earthing parameters measurement by the subharmonic method. Considerations have been made for measuring and interfering signals of a sinusoidal shape and also for more realistic conditions in which the measurement current shape is similar to a rectangle and the interfering signal includes lower odd harmonics (up to 13). As a result of simulations performed it was established that in case of the frequency deviations equal to about 1% and the interfering signal amplitude equal to about 250% of the measurement signal amplitude it is easy to keep the measurement errors below 2%. In the real conditions frequency deviations rarely exceed 0,2%, which allows the conclusion that measurement of the earthing parameters by the subharmonic method is only slightly sensitive to the network frequency deviations.

**Keywords:** earthing resistance, subharmonic method, frequency of interference.

## 1. Wprowadzenie

Utrzymanie prawidłowych parametrów uziemień jest bardzo istotne dla zapewnienia warunków poprawnej pracy wielu urządzeń elektrycznych, a także dla zachowania bezpieczeństwa obsługi tych urządzeń. Pomiar rezystancji, a niekiedy impedancji uziemień nastrożają jednak wielu problemów mimo bardzo niskiej wymaganej dokładności pomiaru. Związane jest to z niedo-

stateczną często znajomością obiektu badanego, jego zmiennością wynikającą np. ze zmian warunków atmosferycznych, a także z występujących często w gruncie zakłóceń. Ten ostatni problem jest szczególnie widoczny przy pomiarach na obszarach o dużym nasyceniu urządzeniami energetycznymi, takich jak stacje transformatorowe czy też zakłady przemysłowe, a także w okolicy urządzeń trakcyjnych powodujących przepływ w gruncie prądu stałego.

W większości powszechnie stosowanych mierników rezystancji uziemienia pomiary wykonywane są przy użyciu metody technicznej. Wartość badanej rezystancji wyznacza się na podstawie zmierzonych wartości generowanego prądu pomiarowego oraz wywołanego przepływem tego prądu spadku napięcia na rezystancji uziemienia badanego w odniesieniu do strefy ustalonego potencjału. W zależności od stosowanych mierników prądy pomiarowe nie przekraczają zazwyczaj wartości 300 mA, a niekiedy osiągają nawet wartości pojedynczych miliamperów. Oznacza to, że wartości sygnałów zakłócających mogą być nawet kilkukrotnie większe od sygnałów pomiarowych.

W celu zmniejszenia wpływu zakłóceń na wynik pomiaru w obrębie sieci o częstotliwości 50 Hz stosuje się najczęściej prąd pomiarowy o częstotliwości 128 Hz. Nie ma on niskich harmonicznych wspólnych z harmonicznymi sygnałami zakłócającymi pochodzącymi z sieci. Skuteczność metod wykorzystujących ten sposób eliminacji zakłóceń jest ograniczona, wobec czego współczesne mierniki w przypadku stwierdzenia nadmiernego poziomu zakłóceń sygnalizują ten fakt łącznie z wyświetlanym wynikiem lub blokują możliwość wykonania pomiaru.

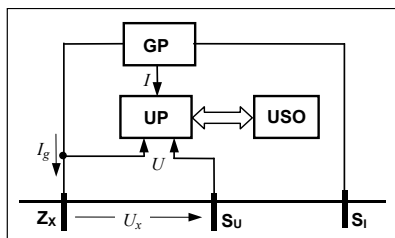
W trakcie prac dotyczących pomiarów parametrów uziemień, prowadzonych na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, opracowano metodę filtracji sygnałów zakłócających o wartościach wielokrotnie przekraczających poziom sygnału pomiarowego, wykorzystującą prąd pomiarowy o częstotliwości stanowiącej podharmoniczną częstotliwości sieciowej [1]. Do wyznaczania wartości prądu i spadku napięcia na badanym uziemieniu stosuje się tzw. metodę szczególnego próbkowania [2]. Ta niezwykle prosta w realizacji metoda pozwala na szybki pomiar harmonicznej podstawowej przebiegu badanego z całkowitą eliminacją wpływu składowej stałej, wszystkich parzystych harmonicznych oraz wybranych harmonicznych nieparzystych.

## 2. Pomiar rezystancji uziemienia metodą podharmonicznej

Metoda szczególnego próbkowania umożliwia selektywne wyznaczanie harmonicznej podstawowej z całkowitą eliminacją składowej stałej oraz wszystkich harmonicznych parzystych przebiegu badanego. Stosując tą metodę do filtracji zakłóceń w pomiarach uziemień należy więc wymusić przepływ przez badane uziemienie prądu pomiarowego o częstotliwości 25Hz, a więc podharmonicznej w stosunku do częstotliwości sieciowej [1]. Przebiegi zakłócające o częstotliwości 50Hz wraz z ich wyższymi harmonicznymi stają się w takim przypadku harmonicznymi parzystymi sygnału testowego i jako takie są niezwykle skutecznie eliminowane przez metodę szczególnego próbkowania.

Pomiar rezystancji (impedancji) uziemienia wykorzystujący proponowany sposób filtracji zakłóceń można wykonać przy użyciu metody technicznej, w układzie pokazanym na rysunku 1. W układzie tym prąd  $I_g$  o częstotliwości 25 Hz wytwarzany jest w generatorze GP. Przepływa on przez badane uziemienie  $Z_X$  oraz zamykającą obwód sondę prądową  $S_I$ . Sonda napięciowa  $S_U$  musi być umieszczona w gruncie w strefie ustalonego potencjału. Wartości prądu oraz spadku napięcia wyznaczane są w układzie po-

miarowym UP współpracującym z układem sterująco-obliczeniowym USO.



Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy układu do pomiaru impedancji uziemienia  
Fig. 1. Simplified block diagram of the system for earthing impedance measurement

W przypadku idealnym generowany prąd jest sinusoidalny, a jego wartość chwilową opisuje zależność:

$$i_g(x) = I_1 \cdot \sin x \quad , \quad (1)$$

przy czym

$$x = \omega \cdot t = 2\pi \cdot \frac{t}{T_g} \quad , \quad (2)$$

gdzie:  $T_g$  – okres prądu generowanego.

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

$$u_g(x) = U_1 \cdot \sin(x + \alpha_1) \quad , \quad (3)$$

gdzie:  $\alpha_1$  - przesunięcie fazowe w stosunku do prądu generowanego  $i_g$ .

Jednocześnie na skutek obecności w gruncie prądów błądzących, zarówno stałych jak i przemiennej o częstotliwości sieciowej, pomiędzy uziemieniem  $Z_x$  a sondą napięciową  $S_u$  mogą pojawić się dodatkowe spadki napięcia. Dla prądu  $I_g$  o częstotliwości 25 Hz, stanowiącej pierwszą podharmoniczną częstotliwości sieciowej, zakłócające spadki napięcia można opisać zależnością:

$$u_z(x) = U_0 + \sum_{k=1} U_{2k} \cdot \sin(2kx + \alpha_{2k}) \quad , \quad (4)$$

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

Do wejścia układu pomiarowego doprowadzany jest sygnał  $U_x$  będący sumą spadków napięcia od prądu  $I_g$  oraz sygnałów zakłócających:

$$u_x(x) = U_0 + U_1 \cdot \sin(x + \alpha_1) + \sum_{k=1} U_{2k} \cdot \sin(2kx + \alpha_{2k}) \quad . \quad (5)$$

Sygnał  $u_x$  próbkowany jest w wybranych chwilach czasowych zaś z pobranych wartości próbek tworzone są zgodnie z zasadami metod szczególnego próbkowania [1] odpowiednie sumy i różnice, które w efekcie dają zależność:

$$r(x) = 4 \cos \gamma \cdot U_1 \cdot \cos(x + \alpha_1) \quad , \quad (6)$$

proporcjonalną do harmonicznej podstawowej  $U_1$  spadku napięcia na uziemieniu, wywołanym przepływem prądu generowanego. Jest ona również wolna od wpływu składowych zakłócających zarówno stałych ( $U_0$ ) jak i przemiennej o częstotliwości sieciowej wraz ze wszystkimi wyższymi harmonicznymi tej częstotliwości ( $U_{2k}$ ).

Na podstawie wartości pobranych próbek można wyznaczyć dwie składowe spadku napięcia na badanym uziemieniu:  $U_{1Re}$  zgodną ze składową podstawową prądu generowanego  $I_g$  oraz  $U_{1Im}$  - ortogonalną do tego prądu. W podobny sposób wyznacza się wartość harmonicznej podstawowej  $I_1$  prądu przepływającego przez badane uziemienie.

Ostateczną wartość impedancji uziemienia  $Z_x$  wyznacza się w mikrokontrolerze, uwzględniając fakt, iż częstotliwość prądu, dla którego uziemienie ma spełniać swoje zadanie jest dwukrotnie większa od częstotliwości sygnału testowego. Wynik pomiaru należy więc określić zgodnie z zależnością:

$$Z_x = \frac{1}{I_1} \cdot \sqrt{U_{1Re}^2 + 4 \cdot U_{1Im}^2} \quad . \quad (7)$$

Dla wyznaczenia rezystancji uziemienia badanego  $R_x$  można zastosować prostszą zależność :

$$R_x = \frac{U_{1Re}}{I_1} \quad . \quad (8)$$

Obliczony wynik pomiaru impedancji lub rezystancji badanego uziemienia jest wolny od wpływu sygnałów zakłócających stałych oraz przemiennej o częstotliwości sieciowej.

### 3. Wpływ odchyłek częstotliwości na dokładność pomiarów

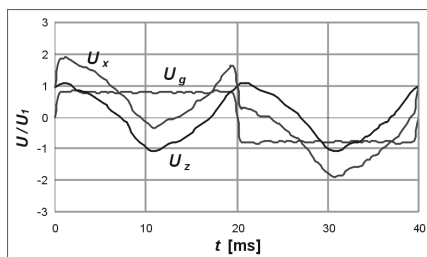
Występowanie zakłóceń o częstotliwości sieciowej może w istotny sposób utrudniać badanie uziemień, szczególnie na obszarach silnie zindustrializowanych. Pomiary rezystancji lub impedancji uziemień z wykorzystaniem metody podharmonicznej pozwalają skutecznie eliminować wpływ sygnałów zakłócających pod warunkiem zastosowania prądu pomiarowego o częstotliwości równej połowie częstotliwości zakłócającej. Zarówno naturalnie występujące w sieci odchyłki częstotliwości [3] jak również generowanie prądu pomiarowego o częstotliwości odbiegającej od założonej wartości 25 Hz powoduje jednakże niedotrzymanie podstawowego założenia metody podharmonicznej.

W celu sprawdzenia wrażliwości metody na niedopasowanie częstotliwości wykonano szereg badań symulacyjnych przy czym przyjęto założenie, że częstotliwość generowanego prądu pomiarowego jest stała i wynosi 25 Hz zaś częstotliwość sieci podlega wahaniom dopuszczalnym przez normę w zakresie  $\pm 1\%$  [3].

Podstawowe obliczenia przeprowadzono dla identycznych wartości amplitudy składowej podstawowej spadku napięcia wywołanego przepływem prądu pomiarowego oraz amplitudy składowej podstawowej sygnału zakłócającego. Błędy pomiarowe wyznaczano dla trzech przypadków: 1) prądu pomiarowego oraz sygnału zakłócającego o przebiegach sinusoidalnych, 2) prądu pomiarowego o kształcie zbliżonym do prostokąta (do 49-tej harmonicznej) i sinusoidalnym zakłóceniu, 3) prądu pomiarowego jak w p. 2 i sygnału zakłócającego odkształconego (harmoniczne nieparzyste do 13-tej). Przykładowe przebiegi sygnałów dla przypadku 3-go (najbardziej zbliżonego do rzeczywistości) pokazano na rysunku 2. W każdym przypadku wyznaczano błędy z zastosowaniem wstępnego filtra analogowego oraz bez filtra.

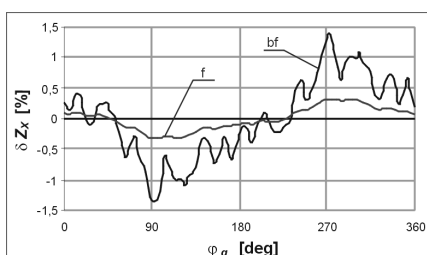
Do analizy przyjęto najprostszą odmianę metody szczególnego próbkowania wymagającą pobrania w ciągu okresu zaledwie 16 próbek, które pozwalają na eliminację wpływu składowej stałej oraz wszystkich harmonicznych parzystych, a także eliminację wpływu 3-ciej i 5-tej oraz tłumienie wyższych harmonicznych [4].

Na rysunku 3 pokazano wykres błędów pomiaru impedancji  $\delta Z_x$  dla sygnałów z rysunku 2 w zależności od chwili rozpoczęcia pobierania serii próbek. Kolejne wykresy przedstawiają natomiast wartości maksymalne błędów przy próbkowaniu asynchronicznym w stosunku do sygnału pomiarowego.



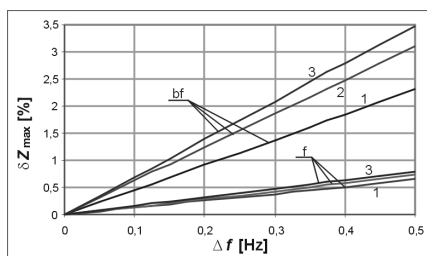
Rys. 2. Przykładowy przebieg rzeczywistego sygnału pomiarowego  $U_g$  (25Hz), zniekształconego sygnału zakłócającego  $U_x$  (50Hz+ $\Delta f$ ) oraz sumarycznego sygnału mierzonego  $U_z$ .

Fig. 2. Sample run of the real measurement signal  $U_g$  (25Hz), distorted interfering signal  $U_x$  (50Hz+ $\Delta f$ ) and total measured signal  $U_z$



Rys. 3. Błąd wyznaczania impedancji uziemia dla sygnałów z rys.2 z filtracją wstępną (f) i bez filtracji (bf) w zależności od chwili początkowej serii próbek  
Fig. 3. Error of determining the earthing impedance for signals from Fig. 2 with preliminary filtration (f) and without filtration (bf) depending on the initial instant of taking series of samples

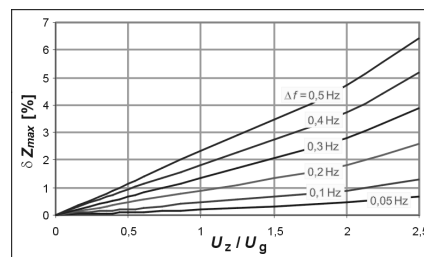
Na rysunku 4 pokazano wartości maksymalne błędów pomiaru impedancji w funkcji odchyłki częstotliwości. Jak widać błędy te nie przekraczają wartości 3,5% co jest już wartością całkowicie satysfakcjonującą w przypadku pomiarów uziemień. Zastosowanie wstępnej filtracji analogowej sygnałów zmniejsza omawiane błędy poniżej poziomu 1%. Wykorzystanie metody szczególnego próbkowania z pobieraniem większej ilości próbek w ciągu okresu również znacznie zmniejszyłoby poziom błędów pomiarowych [4]. Ponadto należy zwrócić uwagę na to, iż omawiane błędy wyznaczone są dla odchyłek częstotliwości  $\pm 1\%$  podczas gdy w rzeczywistości nie przekraczają one w przytłaczającej większości czasu wartości  $\pm 0,2\%$  [3]. Jak więc widać metoda podharmonicznej wykorzystywana do wyznaczania parametrów uziemień pozwala na pomiary ze znikomą wrażliwością na odchyłki częstotliwości sieci już przy zastosowaniu bardzo prostych środków technicznych.



Rys. 4. Błąd maksymalny wyznaczania impedancji uziemia z filtracją wstępną (f) i bez filtracji (bf) w funkcji odchyłki częstotliwości sieci, dla sygnałów: 1 -  $U_g$  (sin.),  $U_x$  (sin.); 2 -  $U_g$  (rzeczyw.),  $U_x$  (sin.o); 3 -  $U_g$  (rzeczyw.),  $U_x$  (zniekształc.)

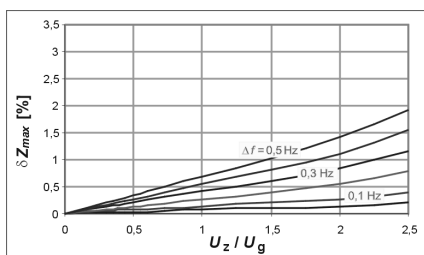
Fig. 4. Maximum error of determining the earthing impedance with preliminary filtration (f) and without filtration (bf) vs. the network frequency deviation for signals: 1 -  $U_g$  (sinusoidal),  $U_x$  (sinusoidal); 2 -  $U_g$  (real),  $U_x$  (sinusoidal); 3 -  $U_g$  (real),  $U_x$  (distorted)

Dodatkowo przeprowadzono badania wrażliwości metody podharmonicznej na amplitudę sygnałów zakłócających dla wybranych wartości odchyłek częstotliwości. Wyniki symulacji pokazano na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Błąd maksymalny wyznaczania impedancji uziemia bez filtracji w funkcji stosunku amplitudy sygnału zakłócającego do amplitudy generowanego sygnału pomiarowego

Fig. 5. Maximum error of determining the earthing impedance without filtration vs. ratio of the interfering signal amplitude to the generated signal amplitude



Rys. 6. Błąd maksymalny wyznaczania impedancji uziemia z filtracją dla różnych wartości odchyłki częstotliwości sieci w funkcji stosunku amplitudy sygnału zakłócającego do amplitudy generowanego sygnału pomiarowego

Fig. 6. Maximum error of determining the earthing impedance with preliminary filtration vs. the ratio of the interfering signal amplitude to the generated signal amplitude

Z przedstawionych wykresów widać, że przy prawdopodobnych wartościach odchyłek częstotliwości zakłócenia o amplitudzie harmonicznej podstawowej rzędu 250% amplitudy harmonicznej podstawowej sygnału pomiarowego nie powodują wzrostu wartości błędów pomiarowych do niezadowalającego poziomu.

Zastosowanie prostych środków technicznych (filtracji analogowej) pozwala na utrzymanie błędów na bardzo dobrym poziomie nie przekraczającym wartości 2%.

## 4. Wnioski

Wyznaczanie parametrów uziemień z wykorzystaniem metody podharmonicznej pozwala na wykonywanie pomiarów z dobrą dokładnością przy zaangażowaniu prostych środków technicznych. Metoda ta charakteryzuje się znikomą wrażliwością na odchyłki częstotliwości sieci stanowiącej główne źródło sygnałów zakłócających. Dodatkową poprawę jakości pomiarów można uzyskać przez zastosowanie filtracji wstępnej przy użyciu prostych filtrów analogowych.

## 5. Literatura

- [1] Wołoszyk M.: Filtering of interference signals of grounding resistance measurement with subharmonic method. Metrology and Measurements Systems, nr 4/2002.
- [2] Sawicki J.: Modification of Particular Sampling Method, XIII IMEKO Wrlld Congress, Torino (Italy), 1994.
- [3] Musiał E.: Ocena jakości energii elektrycznej w sieciach przemysłowych. Automatyka Elektryka Zakłócenia, nr 1/2010, e-pismo nauk.-techn., www.elektro-innowacje.pl (06.03.2011).
- [4] Wołoszyk M.: Dobór odmiany metody podharmonicznej do filtracji zakłóceń w pomiarach rezystancji uziemia. Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 53, nr 4, 2007.