

Stanowisko do jednoczesnego pomiaru składowych mocy czynnej kilku odbiorników zniekształcających

Streszczenie. W pracy przedstawiono stanowisko laboratoryjne do wyznaczania składowych mocy czynnej kilku równolegle zasilanych odbiorników zniekształcających. Opisano obwód pomiarowy i sposób korekcji błędów przetwarzania torów pomiarowych. Przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów wraz z interpretacją w przypadku zasilania z sieci elektroenergetycznej trzech równolegle połączonych odbiorników. Zaproponowano uzupełnienie bilansu składowych mocy czynnej o składową dodatkową.

Abstract. The paper presents a laboratory stand for determination of active power components of several parallel-powered distorting loads. The measuring circuit and the error correction method are described. Examples of the measurement results in the case of supply from the power grid of three parallel-connected receivers with the interpretation are presented. It is proposed to supplement the balance of power components of the added active power component. (**Stand for simultaneous measurement of active power components of several distorting receivers**).

Słowa kluczowe: składowe mocy czynnej, pomiar mocy, prądy niesinusoidalne, odbiornik zniekształcający, korekcja błędów.

Keywords: active power components, power measurement, non-sinusoidal currents, distorting load, error correction.

Wstęp

Generatory pracujące w sieci elektroenergetycznej wytwarzają napięcie sinusoidalne natomiast znaczna część współczesnych odbiorników pobiera prąd niesinusoidalny. Są to odbiorniki nieliniowe lub o parametrach zmiennych w czasie tzw. zniekształcające. Obecne w prądzie wyższe harmoniczne, poprzez impedancję sieci, powodują odkształcenie napięcia. Oznacza to, że transport energii w sieci energetycznej odbywa się nie tylko za pośrednictwem podstawowej harmonicznej ale również przy udziale wyższych harmonicznych napięcia i prądu.

Aby uwzględnić to zjawisko w pracy [1] a później w [2] zaproponowano wprowadzenie nowych pojęć: moc czynna robocza i moc czynna odbita. Są to składowe mocy czynnej odbiornika zniekształcającego. Moc czynna robocza to moc podstawowej harmonicznej natomiast moc czynna odbita to suma mocy czynnych wyższych harmonicznych, generowanych w odbiorniku, które przyjmują wartości ujemne. Teoria ta dotyczy prostego modelu jednofazowego obwodu z jednym źródłem rzeczywistym, którego impedancja wewnętrzna jest typu LTI (w omawianych przykładach zazwyczaj jest to rezystancja) oraz z jednym odbiornikiem zniekształcającym (oznaczanym jako HGL – harmonics generating load) [1,2]. W zaproponowanym modelu moce czynne wszystkich wyższych harmonicznych mają znak ujemny i stanowią tzw. moc odbitą [1,2]. Wyższe harmoniczne przenoszą energię z odbiornika do źródła, gdzie jest rozpraszana na rezystancji wewnętrznej źródła i w całości uznawana jest za traconą bezużytecznie.

W stosunku do realiów pracy odbiornika zniekształcającego zasilanego z sieci elektroenergetycznej zaproponowany model obwodu jest zbyt uproszczony. Podstawowe wady modelu to założenie, że napięcie otwarcia rzeczywistego źródła jest sinusoidalne (monoharmoniczne) oraz przyjęcie modelu LTI impedancji wewnętrznej źródła. W rzeczywistym systemie energetycznym impedancję źródła stanowi nie tylko impedancja wewnętrzna generatora i sieci doprowadzającej ale również impedancje równolegle dołączonych odbiorników, których część może pobierać niesinusoidalny prąd. Trafniej byłoby założyć zniekształcający charakter zastępczej impedancji wewnętrznej źródła, który skutkuje niesinusoidalnym napięciem otwarcia sieci w miejscu podłączenia odbiornika, dla którego przeprowadzany jest bilans składowych mocy czynnej. Odkształcony charakter napięcia otwarciaowego stwarza warunki do uzyskiwania dodatnich wartości mocy czynnej wyższych harmonicznych.

W celu zweryfikowania tej hipotezy zbudowano stanowisko pomiarowe umożliwiające jednoczesny pomiar składowych mocy czynnej kilku odbiorników zniekształcających zasilanych z sieci elektroenergetycznej. Stanowisko ma być wykorzystane do badania wzajemnego wpływu równolegle pracujących odbiorników z punktu widzenia bilansu składowych mocy czynnej.

Przedmiotem tego opracowania jest przedstawienie rozwiązań zastosowanych przy budowie stanowiska pomiarowego, zastosowanej korekcji błędów przetwarzania torów pomiarowych i przykładowych wyników pomiarów.

Zagadnienia przedstawione w tym artykule były częściowo prezentowane na Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów MKM'2015 [3].

Składowe mocy czynnej odbiorników zniekształcających

Według [1,2] w odosobnionym obwodzie elektrycznym zawierającym sinusoidalne rzeczywiste źródło napięcia, o impedancji wewnętrznej typu LTI, i odbiornik generujący harmoniczne prądu (HGL), moc czynna odbiornika jest różnicą roboczej mocy czynnej niesionej przez podstawową harmoniczną i odbitej mocy czynnej związanej z powrotem energii od zniekształcającego odbiornika do impedancji wewnętrznej źródła za pośrednictwem wyższych harmonicznych. Moc czynna odbiornika jest określana jako różnica dwóch składowych

$$(1) \quad P = P_w - P_r$$

Moc czynna robocza (working) P_w to moc podstawowej harmonicznej obliczana na podstawie wartości skutecznych zespolonych napięcia i prądu

$$(2) \quad P_w = P_1 = \text{real}\{U_1 I_1^*\} = |U_1| |I_1| \cos(\angle U_1 - \angle I_1)$$

natomiast moc czynna odbita (reflected) P_r zdefiniowana jest za pomocą sumy mocy wyższych harmonicznych

$$(3) \quad P_r = -P_n = -\sum_{n>1} P_n$$

gdzie

$$(4) \quad P_n = \text{real}\{U_n I_n^*\} = |U_n| |I_n| \cos(\angle U_n - \angle I_n)$$

W omawianym w [1,2] modelu obwodu, moce czynne wszystkich wyższych harmonicznych są ujemne.

Przedstawiony bilans mocy czynnych (1) odnosi się do obwodu z jednym odbiornikiem zniekształcającym [1,2]. W warunkach rzeczywistych, gdy z sieci energetycznej zasilanych jest więcej odbiorników, w tym niektóre zniekształcające, moce czynne wyższych harmonicznych poszczególnych odbiorników mogą przyjmować znak dodatni. W tym przypadku bilans mocy trzeba zmodyfikować tak aby uwzględnić dodatnie moce wyższych harmonicznych. Bilans składowych mocy czynnej odbiornika zniekształcającego trzeba uzupełnić o składową dodatkową (additional) P_a

$$(5) \quad P = P_w - P_r + P_a$$

Dodatkowa moc czynna P_a to suma dodatnich mocy czynnych wyższych harmonicznych

$$(6) \quad P_a = \sum_{n: P_n > 0, n > 1} P_n$$

Moc odbita P_r nadal jest przeciwną sumą ujemnych mocy czynnych składowych harmonicznych, jednak nie dotyczy to już wszystkich harmonicznych, więc definicja mocy odbitej (3) musi ulec modyfikacji

$$(7) \quad P_r = - \sum_{n: P_n < 0} P_n$$

Do wyznaczenia składowych mocy czynnej: roboczej, odbitej i dodatkowej, podobnie jak zaznaczono w [1,2], niezbędne jest wyznaczenie składowych harmonicznych napięcia oraz prądu na zaciskach odbiornika w celu obliczenia mocy czynnych składowych harmonicznych.

Stanowisko pomiarowe

Zaprojektowano i zbudowano i przetestowano stanowisko pomiarowe umożliwiające wykonanie odpowiednich pomiarów i wyznaczenie składowych mocy czynnej trzech równolegle pracujących odbiorników zniekształcających.

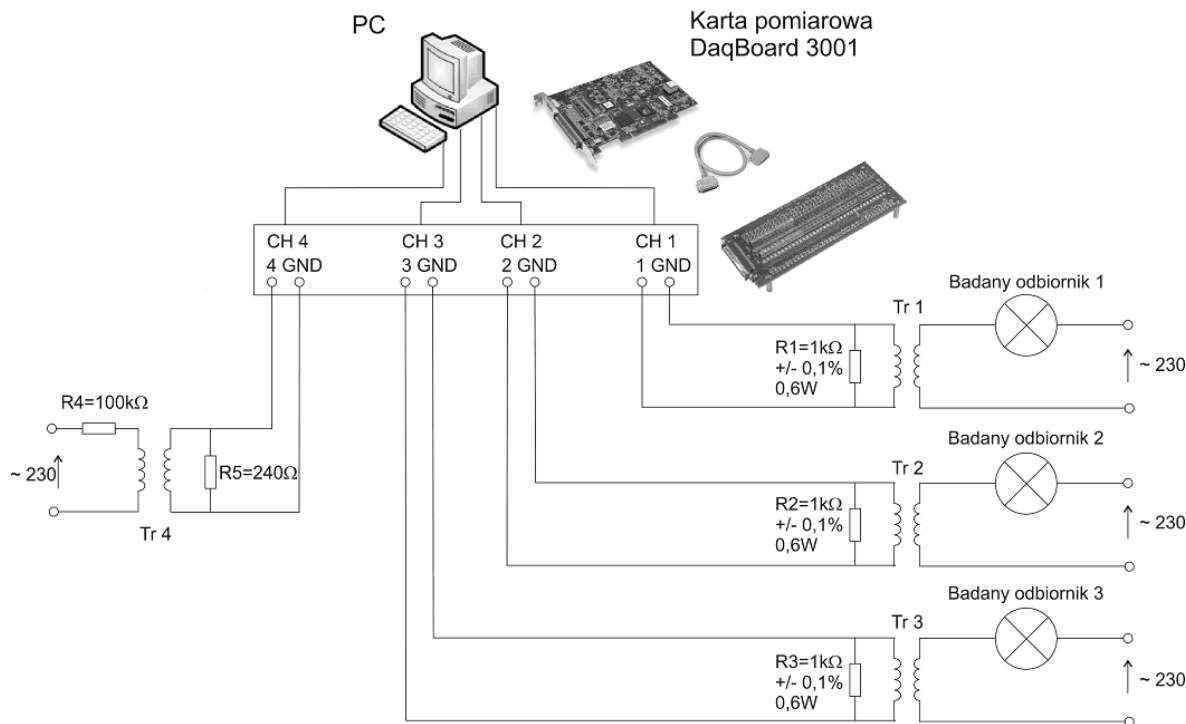
Projektując stanowisko pomiarowe kierowano się następującymi przesłankami:

- jednoczesny pomiar składowych mocy czynnej trzech równolegle pracujących odbiorników;
- pomiar na zasadzie zbierania próbek przebiegów czasowych napięcia i prądów odbiorników;
- moce składowych harmonicznych obliczane na podstawie widm napięcia i prądów wyznaczonych za pomocą dyskretnego przekształcenia Fouriera;
- oddzielenie galwaniczne obwodów pomiarowych;
- odpowiednio duża częstotliwość próbkowania aby uniknąć stosowania filtrów antyaliasingowych;
- korekcja błędów przetwarzania toru pomiarowego;

Stanowisko pomiarowe zostało zbudowane w ramach realizacji pracy [4]. Układ zawiera cztery obwody wejściowe, jeden do pomiaru napięcia oraz trzy do pomiaru prądów trzech odbiorników. Aby uzyskać oddzielenie galwaniczne, jako przetworniki i/u zastosowano odpowiednio obciążone transformatory prądowe. Również za pośrednictwem transformatora odbywa się pomiar napięcia. Do akwizycji próbek wykorzystano kartę pomiarową DaqBoard 3001 firmy IOtech oraz odpowiednie oprogramowanie [5]. Schemat układu pomiarowego przedstawiony jest na rys.1.

Pomiar polega na zbieraniu próbek napięcia i prądów poszczególnych odbiorników. Na podstawie próbek, za pomocą dyskretnego przekształcenia Fouriera (DFT), wyznaczone są widma mierzonych sygnałów. Kolejne operacje to korekcja błędów przetwarzania i wyznaczenie składowych mocy czynnej poszczególnych odbiorników.

Pomiar mocy czynnych składowych harmonicznych wymaga rozbudowanego układu pomiarowego i złożonego algorytmu przetwarzania sygnałów. Należy liczyć się ze znacznymi błędami uzyskiwanych wyników. Duże znaczenie dla prawidłowego obliczenia mocy czynnych składowych harmonicznych ma dokładność wyznaczenia widm sygnałów, w tym również przesunięć fazowych między składowymi harmonicznymi napięcia i prądu. Niestety zastosowane obwody kondycjonowania sygnałów, zawierające transformatory i rezystory, wykazują zależność charakterystyki przetwarzania od częstotliwości.



Rys.1. Schemat układu do pomiaru napięcia i prądów trzech odbiorników (źródło: [4])

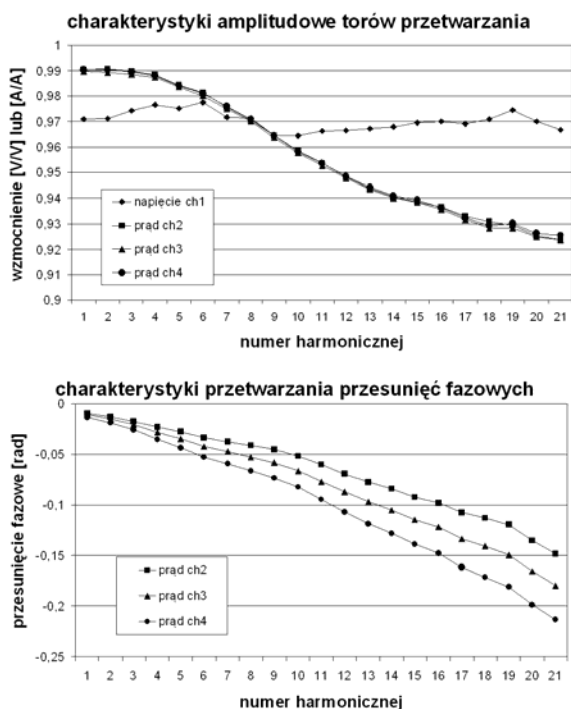
Z tego powodu zdecydowano przeprowadzić korekcję uzyskanych widm w sposób podobny do przedstawionego w pracach [6-8]. Opisana tam metoda korekcji opiera się na częstotliwościowych charakterystykach błędów natomiast tutaj wyznaczono częstotliwościowe charakterystyki przetwarzania torów pomiarowych i wykorzystano je do korekcji (rekonstrukcji) widm przetwarzanych sygnałów.

Zastosowana metoda korekcji opiera się na liniowym modelu układów przetwarzania. Uznano, że taki model jest właściwy, ponieważ wykorzystywane transformatory prądowe w znamionowym zakresie pracy (do 1A) mają liniową charakterystykę magnesowania. Przyjęcie nieliniowego modelu toru przetwarzania, tak jak w [9,10], miałoby uzasadnienie przy znacznym przekroczeniu prądu znamionowego.

Charakterystyki częstotliwościowe torów przetwarzania sygnałów wyznaczono w następujący sposób.

- wykorzystując kalibrator ROTEK 800 wykonano serię pomiarów. Na wejście napięciowe podawano napięcie a na wejścia prądowe podawano prąd stanowiące złożenie pierwszej oraz kolejno jednej wyższej harmonicznej o zadanych parametrach;
- na podstawie zebranych próbek, stosując dyskretne przekształcenie Fouriera, wyznaczono amplitudy zespolone harmonicznych mierzonych sygnałów;
- wyznaczono charakterystyki amplitudowe torów przetwarzania dzieląc obliczone amplitudy harmonicznych przez wartości zadane na kalibratorze;
- wyznaczono charakterystyki przetwarzania przesunięć fazowych między harmonicznymi napięcia i prądu dla trzech torów prądowych; Za każdym razem punktem odniesienia była faza początkowa podstawowej harmonicznej napięcia.

Charakterystyki przetwarzania układu pomiarowego przedstawione są na rys.2. Rozbieżność charakterystyk fazowych wynika z opóźnienia momentów próbkowania między kanałami o 5 μ s.



Rys.2. Charakterystyki przetwarzania układu pomiarowego

Przykładowe wyniki pomiarów i obliczeń

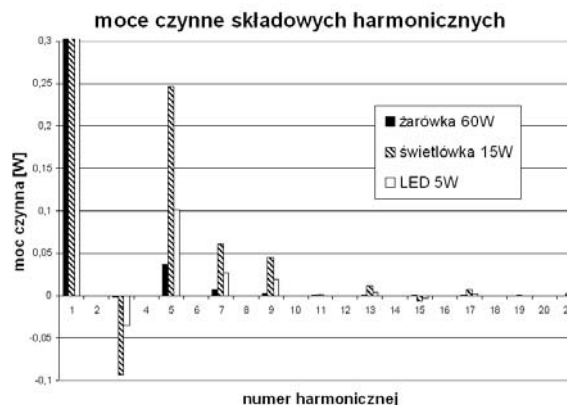
Wykonano pomiary napięcia i prądów trzech równolegle pracujących odbiorników: żarówki 60W, świetlówki 15W, oraz diody LED 5W. Przebiegi prądów przedstawia rys.3.

Wykorzystując próbki sygnałów obejmujące 10 okresów (200ms) obliczono widma napięcia oraz prądów. Dla każdej harmonicznej skorygowano widma amplitudowe oraz różnice faz napięcia i prądów wykorzystując charakterystyki przetwarzania układu pomiarowego. Następnie obliczono moce składowych harmonicznych P_n . Uzyskane wyniki pokazano na rys.4. Moc podstawowej harmonicznej nie jest widoczna w całości. Odpowiednio grupując i sumując moce składowych harmonicznych obliczono, według wzorów (2), (6) i (7), składowe moce czynnej badanych odbiorników.

Zastosowanie korekcji widm badanych sygnałów znacznie zredukowało błędy systematyczne wprowadzane przez układ pomiarowy. Należało jeszcze uwzględnić błędy przetwornika A/C oraz błędy wyznaczenia widm za pomocą DFT przy braku pełnej synchronizacji próbkowania. Na podstawie rozważań dotyczących właściwości DFT [11] oraz propagacji błędów w algorytmie DFT [12] niepewność wyznaczenia mocy składowych harmonicznych oszacowano na poziomie 0,5%. Uzyskane wartości składowych moce zapisane są w tab. 1.



Rys.3. Przebieg czasowy prądów odbiorników



Rys.4. Moce składowych harmonicznych

Tabela 1. Składowe moce czynnej badanych odbiorników

	żarówka 60W	świetlówka 15W	LED 5W
Moc czynna P [W]	57,08	16,63	6,22
Moc czynna robocza P_w [W]	57,03	16,36	6,11
Moc czynna odbita P_r [W]	0,0017	0,10	0,039
Moc czynna dodatkowa P_a [W]	0,049	0,38	0,16
P_w/P	0,999	0,984	0,982

Dyskusja uzyskanych wyników

Niezerowa wartość składowej odbitej mocy czynnej żarówki może wzbudzać wątpliwości. Ze względu na niepewność pomiarów uzyskany wynik należy traktować z pewną rezerwą, jednak nie należy go całkowicie odrzucać. Żarówka, jako element nieliniowy warunkowo zależny od

temperatury włókna, w określonym punkcie pracy uważana jest za dwójnik liniowy. Okazuje się że jest inaczej. Bezładność termiczna włókna nie jest wystarczająco duża i nawet w okresie zmian napięcia sieci zaobserwować można zmianę rezystancji żarówki powodującą modulację prądu, czyli zniekształcający charakter odbiornika.

To zjawisko można zaobserwować na rys. 5. gdzie widoczne są fragmenty przebiegów czasowych napięcia i prądu badanej żarówki. Skale osi prądu i napięcia są tak dopasowane, aby przebiegi na wykresie osiągały podobną wysokość. Na etapie narastania napięcia, gdy włókno żarówki jest chłodniejsze, prąd uzyskuje względnie większe wartości, krzywa prądu jest powyżej przebiegu napięcia. Po osiągnięciu maksymalnej wartości napięcia, gdy włókno osiąga najwyższą temperaturę, prąd uzyskuje względnie mniejsze wartości, krzywa prądu jest poniżej przebiegu napięcia. Ten rozkład wartości prądu nie wynika z przesunięcia fazowego między napięciem a prądem tylko ze zmian rezystancji włókna pod wpływem zmian temperatury.



Rys.3. Przebieg czasowy prądów odbiorników

Uzyskane wyniki wskazują, że składowa odbita mocy czynnej badanych odbiorników zniekształcających jest kilkakrotnie mniejsza od składowej dodatkowej. Oznacza to, że przy zasilaniu z sieci elektroenergetycznej, nawet odbiorniki zniekształcające wykorzystują energię dostarczaną również za pośrednictwem wyższych harmonicznych napięcia i prądu. Sytuacja ta znacznie różni się od przedstawionej w pracy [2]. Opisane tam pomiary przeprowadzono w odosobnionym obwodzie zawierającym jedno źródło napięciowe z dołączonym rezystorem oraz jeden odbiornik zniekształcający – zgodnie z modelem obwodu stanowiącym podstawę bilansu składowych mocy czynnej odbiornika zniekształcającego (1)-(4). Wyniki przedstawione w [2] pokazują, że dla badanych odbiorników zniekształcających składowa robocza jest większa od mocy czynnej $P_w > P$. Wyniki pomiarów przedstawione w tabeli 1., uzyskane dla odbiorników zasilanych z sieci, wskazują na odwrotną sytuację, tzn. składowa robocza jest mniejsza od mocy czynnej $P_w < P$.

Ta jakościowa różnica uzyskanych wyników świadczy o tym, że model obwodu przyjęty do zdefiniowania bilansu składowych mocy czynnej, przedstawiony w [1,2], w niewystarczający sposób oddaje realia pracy odbiorników zniekształcających zasilanych z sieci elektroenergetycznej. Pomijany jest fakt wykorzystywania przez odbiorniki również energii dostarczanej za pośrednictwem wyższych harmonicznych.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono budowę i sposób działania stanowiska do jednoczesnego pomiaru składowych mocy czynnej trzech równolegle pracujących odbiorników zniekształcających. W celu zwiększenia dokładności pomiarów zastosowano korekcję (rekonstrukcję) widm mierzonych sygnałów w oparciu o częstotliwościowe charakterystyki przetwarzania torów pomiarowych.

Zaprezentowano przykładowe wyniki pomiarów i ich częściową interpretację. Zaproponowano wprowadzenie jeszcze jednej składowej mocy czynnej, tzw. składowej dodatkowej, obejmującej dodatkowo moce czynne wyższych harmonicznych. Wyniki pomiarów potwierdziły słuszność takiego rozszerzenia bilansu składowych mocy czynnej.

Stanowisko zostało zbudowane w celu przeprowadzenia badań wzajemnego wpływu odbiorników zniekształcających z punktu widzenia bilansu składowych mocy czynnej.

Autorzy: dr hab. inż. Radosław Kłosiński prof. UZ, mgr inż. Arkadiusz Antoniewicz, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektroniki i Informatyki, ul. Prof. Szafrana 2, 65-246 Zielona Góra, E-mail: R.Klosinski@imei.uz.zgora.pl, arkadiusz.antoniewicz@gmail.com

LITERATURA

- [1] Czarnecki L.S., Robocza, odbita i szkodliwa moc czynna, *Materiały VIII Konferencji naukowej SP 2010*, OWUZ, Zielona Góra, 2010, s. 27-30.
- [2] Czarnecki L.S., Toups T.N., Working and reflected active powers of harmonics generating single-phase loads, *Przeгляд Elektrotechniczny*, R. 90, nr 11, 2014, s. 7-10.
- [3] Kłosiński R., Antoniewicz A., Pomiar składowych mocy czynnej odbiorników zniekształcających, materiały konferencyjne XLVII Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów - MKM'2015, Zielona Góra - Łagów, Polska, 2015, Oficyna Wydaw. Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2015, s. 19-22.
- [4] Antoniewicz A., Analiza rozkładu mocy czynnej połączonych odbiorników zniekształcających w różnych warunkach zasilania, *Praca dyplomowa magisterska*, WEIiT UZ, Zielona Góra, 2015.
- [5] Kozioł M., Program do akwizycji próbek sygnałów za pomocą kart pomiarowych typu DaqBoard, Zielona Góra 2005.
- [6] Furmankiewicz L., Korekcja błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych przy pomiarach wartości skutecznej sygnałów i mocy czynnej, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 53, nr 9, 2007, s. 691-694.
- [7] Furmankiewicz L., Influence of the nonlinearity of measurement transformers on effectiveness of module error correction, *Przeгляд Elektrotechniczny*, R. 88, nr 11, 2008, s. 257-260.
- [8] Furmankiewicz L., Właściwości metody programowej korekcji błędów częstotliwościowych transformatora prądowego w zakresie nieliniowej pracy przy pomiarach mocy, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 58, nr 9, 2012, s. 767-769.
- [9] Kłosiński R., Kozioł M., Odtwarzanie okresowych sygnałów wejściowych metodą syntezy odwrotnych operatorów cykloparametrycznych układu przetwarzania, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 6, 2006, s. 57-59.
- [10] Kłosiński R., Kozioł M., Korekcja zniekształceń nieliniowych wprowadzanych przez układy wejściowe systemów pomiarowych metodą odwrotnego operatora cykloparametrycznego, *Przeгляд Elektrotechniczny*, nr 7/8, 2006, s. 96-100.
- [11] Krajewski M., Porównanie właściwości algorytmu DFT i klasycznego w pomiarze napięcia z zastosowaniem woltomierza próbującego, *Przeгляд Elektrotechniczny*, nr 11, 2014, s. 29-31.
- [12] Beta G., Liguori C., Pietrosanto A., Propagation of uncertainty in a discrete Fourier transform algorithm, *Measurement* vol. 27, 2000, s. 231-239.