

Wykorzystanie programowalnego źródła napięcia przemiennego do generacji wyższych harmonicznych w badaniach jakości energii elektrycznej

Streszczenie. Ocena jakości energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych wykorzystuje zestaw wielkości normatywnych i uzupełniających. Wśród tych wielkości znajdują się dwie miary zawartości harmonicznych w napięciu: widmo amplitudowe oraz całkowity współczynnik odkształcenia THD. Pomiar oraz rejestracja parametrów służących do oceny jakości energii elektrycznej są wykonywane z wykorzystaniem przyrządów pomiarowych zwanych analizatorami jakości energii elektrycznej. W pracy zaprezentowano przykładowe wyniki badań wybranego analizatora z zastosowaniem programowalnego źródła napięcia przemiennego, przeprowadzonych na przygotowanym stanowisku pomiarowym.

Abstract. The electric power quality evaluation in electrical power networks is a complex measuring task carried out with the use of asset of standard and complementary quantities. Among these quantities two measures of harmonic content in voltage can be mentioned: spectrum amplitude and coefficient THD. The parameters dedicated to assess the power quality are measured and registered with the use of measurement devices called power quality analysers. Examples of the results of testing a selected power quality analyser with the use of programmable AC source in a prepared measuring system are presented in the paper. (The application of programmable AC source to generation of higher harmonics in examination of power quality).

Słowa kluczowe: harmoniczne, DFT, grupowanie, podgrupowanie.

Keywords: harmonics, DFT, grouping, subgrouping.

Wstęp

Rozwój elektroniki powoduje, że pojawia się coraz więcej odbiorników elektrycznych, które pobierają odkształcony (niesinusoidalny) prąd. Dołączenie tego typu odbiorników do sieci elektroenergetycznej powoduje pogorszenie parametrów jakościowych energii elektrycznej spowodowane odkształceniem przebiegów czasowych napięcia. Przejawia się to występowaniem wyższych harmonicznych, interharmonicznych i subharmonicznych [1] oraz supraharmonicznych [2,3].

Analiza widmowa napięcia

Problematyka oceny odkształcenia napięć w sieci elektroenergetycznej została poruszona, między innymi, w dokumentach [4-7]. Ocena jakości energii elektrycznej jest złożonym zadaniem pomiarowym. W ocenie tej wykorzystuje się zestaw wielkości normatywnych i uzupełniających. Wśród zestawu wielkości oceniających są, między innymi, miary zawartości harmonicznych. Odkształcenie jest oceniane widmem amplitudowym czyli zestawem współczynników udziału poszczególnych harmonicznych i współczynnikiem odkształcenia THD. Specyfikacja normatywna obu wielkości określa warunki bardziej rozbudowane niż określone w literaturze z podstaw elektrotechniki.

W dokumencie [4] wyszczególniono dopuszczalne, wyrażone względnie, wartości graniczne poszczególnych harmonicznych napięcia zasilającego u_h oraz współczynnika odkształcenia wyższymi harmonicznymi THD, określonego zależnością (1):

$$(1) \quad \text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2}$$

gdzie u_h oznacza wartość względną napięcia w procentach składowej podstawowej, natomiast h rząd wyższej harmonicznej.

Norma [5] określa następujące wielkości:

- harmoniczna napięcia – napięcie sinusoidalne o częstotliwości równej całkowitej krotności częstotliwości podstawowej napięcia zasilającego,

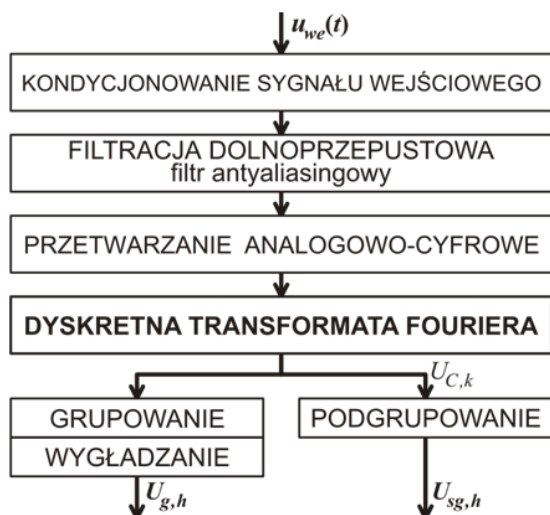
- interharmoniczna – napięcie sinusoidalne o częstotliwości zawartej pomiędzy harmonicznymi tj. częstotliwości nie będącej całkowitą krotnością częstotliwości składowej podstawowej.

Pod pojęciem subharmonicznych należy rozumieć interharmoniczne, których częstotliwości są mniejsze niż częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia, czyli w warunkach krajowych - niż częstotliwość 50 Hz. Norma ta specyfikuje wartości graniczne dla harmonicznych do czterdziestego rzędu.

W dokumencie [6] przedstawiono następujące pojęcia i wytyczne:

- częstotliwość podstawowa – częstotliwość w widmie uzyskanym z transformaty Fouriera funkcji czasu, względem której odniesione są wszystkie częstotliwości widma,
- składowa harmoniczna – każda składowa o częstotliwości harmonicznej,
- częstotliwość harmonicznej – częstotliwość będąca całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej,
- składowa interharmoniczna – składowa o częstotliwości interharmonicznej,
- częstotliwość interharmoniczna – każda częstotliwość, która nie jest całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej,
- podstawowy pomiar harmonicznych napięcia powinien być zgodny z normą IEC 61000-4-7 dla 10-okresowych niezachodzących na siebie podgrup harmonicznych, oznaczonych symbolem $U_{sg,h}$,
- podstawowy pomiar interharmonicznych napięcia, powinien być zgodny z normą IEC 61000-4-7 dla 10 okresowych niezachodzących na siebie centrowanych podgrup interharmonicznych oznaczonych jako $U_{isg,h}$,
- algorytm agregacji pomiarów wyznacza się jako pierwiastek kwadratowy ze średniej arytmetycznej wielkości wejściowych podniesionych do kwadratu,
- agregacja okresowa – dane dla 150-okresowego przedziału czasowego powinny być agregowane z piętnastu 10 okresowych przedziałów,
- agregacja czasu zegarowego – dane do przedziału 2 godzinowego powinny być agregowane z dwunastu przedziałów 10 minutowych.

Norma [7] określa pomiar harmonicznych i interharmonicznych w układzie przedstawionym na rys. 1.



Rys.1. Pomiar harmonicznych zgodnie z normą IEC 61000-4-7

Częstotliwość graniczna filtra antyaliasingowego powinna zapewniać brak zniekształcenia harmonicznych podlegających dalszej analizie. Częstotliwość próbkowania powinna uwzględniać charakterystykę częstotliwościową tego filtra. W pomiarach jest wymagane prostokątne, zsynchronizowane ze zboczem napięcia, okno pomiarowe dla dyskretnej transformaty Fouriera DFT o czasie $T_w = 10/f_c$, gdzie f_c oznacza częstotliwość podstawowej harmonicznej. Czas okna pomiarowego T_w narzuca najniższą częstotliwość wyniku obliczeń DFT oraz rozdzielczość częstotliwości Δf .

$$(2) \quad \Delta f = \frac{1}{T_w} = 5 \text{ Hz}$$

Wartość czasu okna pomiarowego T_w wpływa na wyniki dyskretnej transformaty Fouriera.

Grupowanie i podgrupowanie jako metoda pomiaru harmonicznych

Zależność (1), znana z literatury dotyczącej podstaw elektrotechniki, umożliwia wyznaczenie współczynnika odkształcenia THD jako jednej z miar odkształcenia napięcia. Jednakże w normie IEC 61000-4-7 przedstawiona jest inna metoda wyznaczania zniekształceń harmonicznymi z wykorzystaniem procedury grupowania i podgrupowania.

W celu ilościowego określenia zniekształceń w układach pomiarowych w dokumencie [7] zdefiniowano następujące wielkości:

- komponent $U_{C,k}$ – wartość skuteczna k -tego wyniku DFT o częstotliwości f_k będącej całkowitą wielokrotnością rozdzielczości częstotliwości $f_k = k \cdot \Delta f$,
- wartość skuteczna $U_{H,h}$ harmonicznej h -tego rzędu określana jest na podstawie zależności (3):

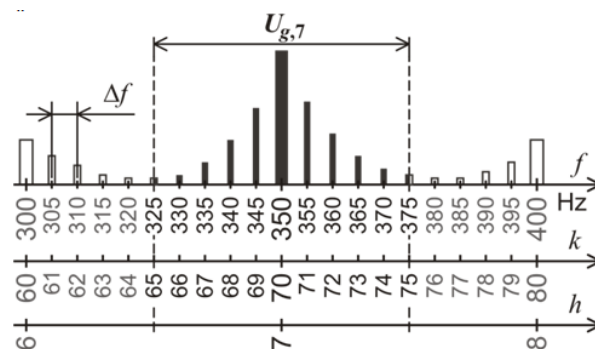
$$(3) \quad U_{H,h} = U_{C,N \cdot h},$$

gdzie N – liczba okresów podstawowej harmonicznej w oknie pomiarowym T_w .

Grupa harmonicznej h -tego rzędu jest określana na podstawie wartości h -tej harmonicznej i dziesięciu najbliższych sąsiednich interharmonicznych:

$$(4) \quad U_{g,h}^2 = \frac{1}{2} \cdot U_{C,(N \cdot h) - N/2}^2 + \sum_{i=(-N/2+1)}^{(N/2)-1} U_{C,(N \cdot h) + i}^2 + \frac{1}{2} \cdot U_{C,(N \cdot h) + N/2}^2$$

Na rysunku 2 przedstawiono graficzną interpretację procesu grupowania 7. harmonicznej.

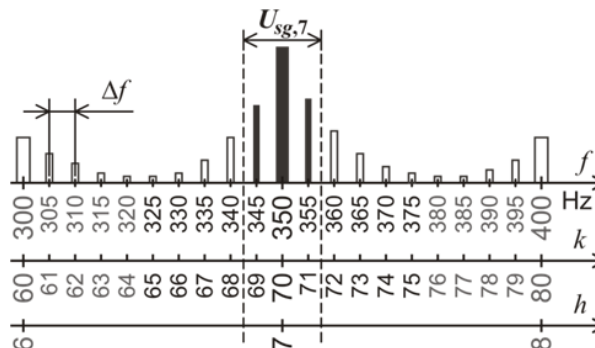


Rys. 2. Graficzne przedstawienie grupy 7 harmonicznej

Podgrupa harmonicznej h -tego rzędu jest określana na podstawie wartości h -tej harmonicznej i dwóch najbliższych sąsiednich interharmonicznych:

$$(5) \quad U_{sg,h}^2 = \sum_{i=-1}^1 U_{C,(N \cdot h) + i}^2$$

Na rysunku 3 przedstawiono graficzną interpretację określania wartości podgrupy harmonicznej 7. rzędu.



Rys. 3. Graficzne przedstawienie podgrupy 7. harmonicznej

Współczynnik odkształcenia harmonicznymi THDG wyznaczany na podstawie grup harmonicznych (4) jest dany zależnością (6):

$$(6) \quad \text{THDG}_U = \sqrt{\sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} \left(\frac{U_{g,h}}{U_{g,1}} \right)^2},$$

gdzie: $h_{\min} \geq 2$, $h_{\max} = 40$.

Współczynnik odkształcenia harmonicznymi THDS wyznaczony z zastosowaniem podgrupowania harmonicznych (5) przedstawiono w postaci zależności (7):

$$(7) \quad \text{THDS}_U = \sqrt{\sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} \left(\frac{U_{sg,h}}{U_{sg,1}} \right)^2}$$

Jak już wspomniano, w rozporządzeniu [4] jest brak opisu sposobu pomiaru poszczególnych wielkości. Dlatego niezbędne jest odwołanie się do innych dokumentów. W ramach „dobrej praktyki” korzysta się z norm z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej – metody badań i pomiarów. Pomiar harmonicznych i interharmonicznych precyzuje IEC 61000-4-7 [7] a ich dopuszczalne wartości określają pozycje [3-4].

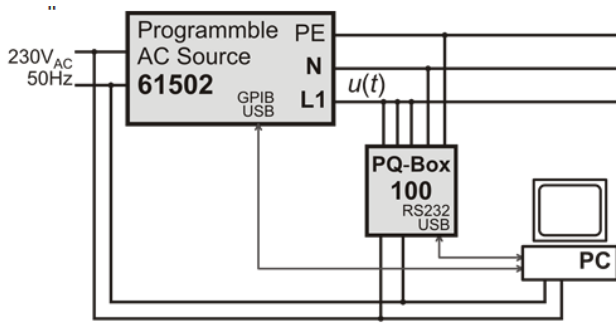
W pracach [8] i [9] opisano zadawanie napięciowych sygnałów testowych z wykorzystaniem generatora 6811B firmy Agilent, sterowanego programem AC-Source GUI. Generator ten umożliwia generację różnych sygnałów testowych. Przykładowo, możliwe jest zadawanie kształtu przebiegu czasowego, sekwencyjną zmianę kształtu przebiegu czasowego, wartości skutecznej i częstotliwości, modulację amplitudy AM i częstotliwości FM przebiegiem harmonicznym. Ponadto możliwa jest generacja sygnału zawierającego wyższe harmoniczne i interharmoniczne z rozdzielczością Δf . Wymaga to przygotowania 1024-elementowej tablicy unormowanych wartości opisujących przebieg czasowy wartości chwilowych i przesłania do generatora. Zawartość przygotowanej tablicy odpowiada przebiegowi czasowemu za jeden okres T_w .

W pracy [8] opisano wyniki badań eksperymentalnych, z wykorzystaniem zestawu sygnałów testowych, za pomocą których dokonano oceny działania kilku wybranych analizatorów jakości energii elektrycznej. Wyniki badań umożliwiły ocenę zgodności działania wybranych analizatorów z wymogami normatywnymi, wykrywanie ewentualnych rozbieżności pomiędzy nimi oraz ocenę rozrzutu wyników pomiarów.

W pracy [9] dokonano oceny pomiaru harmonicznych napięcia za pomocą przygotowanych uprzednio sygnałów testowych złożonych z zestawu wybranych wyższych harmonicznych. Dobór sygnałów testowych umożliwił stwierdzenie, czy badane analizatory wykorzystują algorytm grupowania lub podgrupowania przy ocenie współczynnika odkształcenia THD.

Badania eksperymentalne

Badania wybranego analizatora PQ-Box 100 z wykorzystaniem programowanego źródła napięcia przemiennego, typ 61502 firmy Chroma, przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, które przedstawiono na rysunku 4.



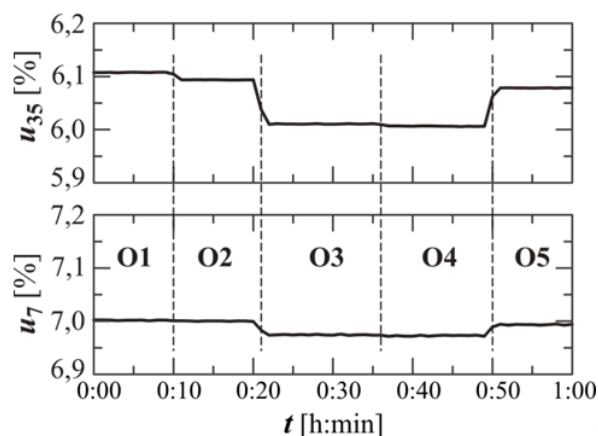
Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do badań analizatora jakości energii elektrycznej

W przedstawionym na rysunku 4 stanowisku pomiarowym programowalne źródło napięcia służy do

zadawania określonego przebiegu testowego. Źródło to umożliwia symulację zapadów i wahań napięcia wg wybranych norm, generację harmonicznych i interharmonicznych o zadanych częstotliwościach, jak również tworzenie własnych przebiegów wyjściowych dostosowanych do potrzeb diagnostycznych. Szczegółowy opis dostępnych funkcji i możliwości pomiarowych tego urządzenia zawiera dokument [10]. Tak wygenerowany sygnał jest następnie podawany na badany analizator PQ-Box-100. Jest to profesjonalny, trójfazowy przenośny analizator, który umożliwia pomiar wielu różnorodnych parametrów takich jak: napięcie, prąd, częstotliwość, moc energia, harmoniczne, interharmoniczne i wiele innych. Połączenie analizatora z komputerem klasy PC, poprzez interfejs USB 2,0, umożliwia przesłanie uzyskanych danych pomiarowych. Dołączone do analizatora oprogramowanie umożliwia szczegółową analizę zarejestrowanych wyników pomiarów, ich obróbkę statystyczną jak również wizualizację w postaci wykresów. Parametry techniczne i pozostałe szczegółowe informacje na temat tego analizatora są dostępne w instrukcji obsługi [11]. Przykładowe zastosowanie tego analizatora do lokalizacji odbiorników niespokojnych, zasilanych z sieci elektroenergetycznej, z zastosowaniem zmienności napięć i prądów, opisano w pracy [12].

Celem przeprowadzenia badań na stanowisku pomiarowym, przedstawionym na rysunku 4, wykorzystano różne sygnały testowe. W pierwszym etapie na wejście podano sygnał sinusoidalny, dla którego wartość oczekiwana zawartości harmonicznych wynosi zero, celem sprawdzenia tzw. „zera” analizatora. W drugim etapie podano na wejście analizatora sygnał odkształcony złożony z harmonicznej podstawowej, o wartości skutecznej równej 220 V oraz wybranych wyższych harmonicznych: 7 o wartości 7% składowej podstawowej i fazie początkowej równej 90°, oraz harmonicznej 35., której wartość skuteczna wynosiła 6% składowej podstawowej, a jej faza początkowa miała wartość 45°.

Na rysunku 5 przedstawiono wykres czasowy obydwóch wyższych harmonicznych dla zadanych obciążeń. Wykresy te przedstawiono w orientacji pionowej, jeden wykres pod drugim, celem łatwiejszej analizy korelacji czasowej. Symbolami O1-O5 oznaczono fragmenty pomiarów wykonanych dla poszczególnych obciążeń.



Rys. 5. Przebiegi czasowe zarejestrowanych wyższych harmonicznych dla wybranych stanów obciążenia źródła napięcia

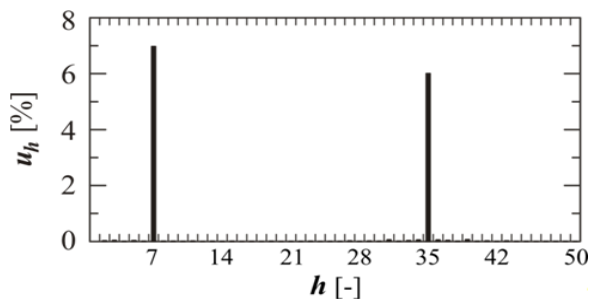
Dla sygnału odkształconego przeprowadzono pomiary przy braku obciążenia źródła napięciowego – O1 oraz dla kilku wariantów obciążenia, takich jak: żarowe źródło światła o mocy 60 W – O2, odbiornik o charakterze

rezystancyjnym o mocy rzędu 800 W – O3, obydwa odbiorniki załączone równocześnie – O4, oraz podłączenie odbiornika o charakterze obciążenia typu RL i mocy rzędu 90 W – O5. Pomiar wartości skutecznej napięcia, dla każdego rodzaju obciążenia, wyznaczano jako agregację pomiarów z 10 cykli pomiarowych. Ponieważ badane źródło napięcia przemiennego, typ 61502 firmy Chroma, jest źródłem jednofazowym, badania przeprowadzono konfigurując analizator do pomiaru w układzie jednofazowym.

Na wykresie (rys.5) można zaobserwować wpływ załączanego obciążenia na wartość obydwóch harmonicznych, przy czym dużo bardziej widoczny efekt występuje dla harmonicznej rzędu 35.

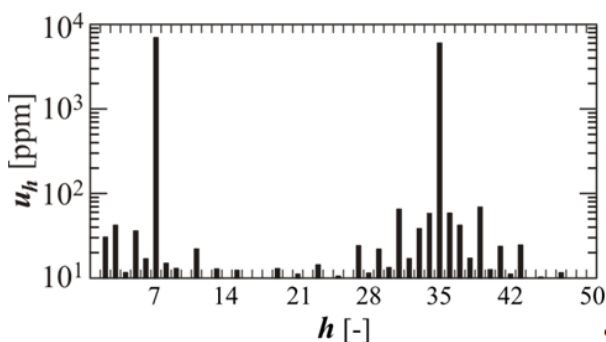
W przypadku braku obciążenia, dla harmonicznej 7. rzędu wartości zadane z generatora są zgodne z wartościami zarejestrowanymi przez badany analizator. W przypadku harmonicznej rzędu 35. występuje rozbieżność pomiędzy tymi wartościami. Błąd względny nie przekracza wartości 2%.

Rysunki 6 i 7 przedstawiają z kolei widmo amplitudowe obydwóch wyższych harmonicznych.



Rys. 6. Widmo amplitudowe zarejestrowanych wyższych harmonicznych

Dane z rysunku 6 pozwalają stwierdzić, że poza dwiema dominującymi harmonicznymi tj. 7 i 35, pozostałe wyższe harmoniczne mają wartości trudne do określenia. Dlatego też na rysunku 7 przedstawiono dane pomiarowe z rysunku 6 w skali logarytmiczno-liniowej. Pozwoliło to na ocenę wartości pozostałych wyższych harmonicznych zarejestrowanych w trakcie eksperymentu. Analiza danych z rysunku 7 pozwala na sformułowanie wniosku, że pozostałe harmoniczne, w stosunku do harmonicznych rzędu 7 i 35 mają wartości skuteczne mniejsze o 2 rzędy i w praktyce ich wartości są do pominięcia.



Rys. 7. Widmo amplitudowe zarejestrowanych wyższych harmonicznych (w skali logarytmiczno-liniowej)

Podsumowanie

W pracy zamieszczono przegląd dokumentów specyfikujących pomiar harmonicznych napięcia w sieci elektroenergetycznej. Zaprezentowano próbę odpowiedzi na pytanie, jak mierzyć harmoniczne. Zwrócono uwagę na etapy pomiaru harmonicznych, niewystępujące w klasycznych podstawach elektrotechniki i teorii sygnałów, w tym, między innymi na koncepcję grupowania i podgrupowania harmonicznych.

Przy doborze wymuszeń testowych zwracano uwagę na minimalizację niezbędnego czasu badań.

Zaprezentowano stanowisko pomiarowe do generacji harmonicznych z wykorzystaniem programowalnego źródła napięcia przemiennego 61502 firmy Chroma. Przedstawiono przykładowe wyniki badań wybranego analizatora PQ-Box 100, dla wybranych sygnałów testowych zawierających wyższe harmoniczne.

LITERATURA

- [1] Kuśmierk Z., Harmoniczne w systemach elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 82 (2006), nr 6, 8-19
- [2] Bollen M., Olofsson M., Larsson A., Rönnberg S., Lundmark M., Standards for Supraharmonics (2 to 150 kHz), *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 3 (2014), no 1, 114-119
- [3] Larsson E.O.A, Bollen M.H.J., Wahlberg M.G., Lundmark C.M., Rönnberg S.K., Measurements of High-Frequency (2–150 kHz) Distortion in Low-Voltage Networks, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 25 (2010), no 3, 1749-1757
- [4] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 04.05.2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego
- [5] PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych, 2010
- [6] IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, 2008
- [7] IEC 61000-4-7 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, 2009
- [8] Otomański P., Wiczyński G., Charakterystyka porównawcza układów pomiarowo – rejestrujących wykorzystywanych do oceny jakości energii elektrycznej, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 53 (2007), nr 9bis, 649-652
- [9] Otomański P., Wiczyński G., Analiza widmowa napięć w sieci elektroenergetycznej w ujęciu normatywnym, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 53 (2007), nr 9bis, 665-668
- [10] Programmable AC Source 61501/61502/61503/61504 User's Manual, Version 1.6, 2010
- [11] Analizator jakości energii PQ-Box 100 – instrukcja obsługi, A.Eberle GmbH & Co., 2008
- [12] Otomański P., Wiczyński G., The usage of voltage and current fluctuation for localization of disturbing loads supplied from power grid, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 1, 107-111

Autorzy: dr. inż. Przemysław Otomański, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: przemyslaw.otomanski@put.poznan.pl; dr hab. inż. Grzegorz Wiczyński, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: grzegorz.wiczynski@put.poznan.pl