

Przemysław OTOMAŃSKI, Grzegorz WICZYŃSKI

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ

Analiza widmowa napięć w sieci elektroenergetycznej w ujęciu normatywnym**dr inż. Przemysław OTOMAŃSKI**

Pracownik Zakładu Metrologii i Optoelektroniki Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Główne obszary zainteresowań dotyczą zagadnień związanych z teorią wyników pomiarów, w szczególności z oceną niepewności wyniku pomiaru, badaniem właściwości metrologicznych czujników i przetworników pomiarowych oraz badań w zakresie oceny jakości energii elektrycznej.

e-mail: otoman@et.put.poznan.pl

**dr inż. Grzegorz WICZYŃSKI**

Pracownik Zakładu Metrologii i Optoelektroniki Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania naukowe: metrologia ukierunkowana na pomiary przemysłowe i biomedyczne, badania w zakresie oceny jakości energii elektrycznej oraz zastosowania systemów sensorycznych w układach sterowania.

e-mail: gwicz@et.put.poznan.pl

**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 (czyli zestaw wartości poszczególnych harmonicznych) oraz współczynnik odkształcenia *THD*. Specyfikacja normatywna obu wielkości określa warunki pomiaru bardziej rozbudowane niż zazwyczaj występujące w literaturze z podstaw elektrotechniki i teorii sygnałów.

W artykule opisano specyfikacje normatywne miar harmonicznych napięć w sieci elektroenergetycznej. Przedstawiono interpretację norm prowadzącą do sprecyzowania pomiaru poszczególnych harmonicznych i współczynnika *THD*. Zamieszczono wyniki badań weryfikujących zgodność działania dwóch urządzeń pomiarowych z wymaganiami normatywnymi.

Słowa kluczowe: harmoniczne, interharmoniczne, grupowanie, podgrupowanie

The spectral analysis of voltages in power network in standard depiction**Abstract**

The electric power quality evaluation in electrical power networks is a complex measuring task carried out with the use of a set of standard and complementary quantities. Among these quantities two measures of harmonic content in voltage can be mentioned: spectrum amplitude and coefficient *THD*. Standard specification of voltage harmonic measures in electrical power networks was presented in the paper. Measurement results, testing the compatibility of two measurement devices for standard requirements, were presented.

Keywords: harmonics, interharmonics, grouping, subgrouping

1. Wprowadzenie

Ocena jakości energii elektrycznej jest złożonym zadaniem pomiarowym. Wyniki oceny stanowią element relacji handlowych dostawca-odbiorca oraz wykorzystywane są w identyfikacji technicznych przyczyn niewłaściwego działania odbiorników. Ocena jakości wykorzystuje zestaw wielkości normatywnych i uzupełniających. Postuluje się, aby wyniki pomiarów wykonane dowolnymi układami pomiarowo-rejestrującymi były porównywalne. Wśród zestawu wielkości oceniających jakość są miary zawartości harmonicznych napięć i prądów. Odkształcenie opisane jest widmem amplitudowym (czyli wartością poszczególnych harmonicznych) oraz współczynnikiem odkształcenia *THD*. Specyfikacja normatywna obu wielkości

określa warunki pomiaru bardziej rozbudowane niż określone w literaturze z podstaw elektrotechniki. Na wiarygodność pomiaru zawartości harmonicznych w istotnym stopniu może wpływać implementacja sprzętowa toru sygnałowego (części analogowej i cyfrowej). Dlatego celowe są badania porównawcze umożliwiające weryfikację prawidłowości pomiaru odkształcenia napięć. W artykule przedstawiona analiza widmowa napięć w sieci elektroenergetycznej o częstotliwości $f = 50\text{Hz}$.

2. Reprezentacja sygnałów okresowych za pomocą szeregu Fouriera

Sygnał okresowy $u(t)$ można przedstawić w postaci trygonometrycznego szeregu Fouriera [1]:

$$u(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (a_h \cos h\omega_0 t + b_h \sin h\omega_0 t) \quad (1)$$

gdzie:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \quad (2)$$

T – okres sygnału okresowego,

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt, \quad (3)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot \cos h\omega_0 t dt, \quad (4)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot \sin h\omega_0 t dt. \quad (5)$$

Reprezentacja sygnału $u(t)$ zgodnie z równaniami (1-5) odwołuje się do nieskończonej liczby składników. W praktyce jest to niemożliwe. Dlatego wykorzystuje się skończoną ilość składników. Sygnał odtworzony na podstawie skończonej ilości składników jest dolnoprzepustowy. W praktyce pomiarowej układów elektroenergetycznych wykorzystuje się zazwyczaj od kilkunastu do kilkudziesięciu pierwszych składników. Istotnym problemem może być pomiar okresu T podstawowej harmonicznej, zwłaszcza przy występowaniu interharmonicznych. Błąd pomiaru okresu T propaguje się do wartościami poszczególnych harmonicznych.

3. Analiza widmowa napięcia jako składnik prawnej i normatywnej oceny jakości energii elektrycznej

Problematyka analizy widmowej występuje m.in. w następujących dokumentach:

- Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dn. 20.12.2004 w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji tych sieci. Dz. U. nr 2 z dn. 6.01.2005, poz. 6 [2],
- Norma PN-EN 50160, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych [3],
- Norma PN-EN 61000-4-30, Metody badań i pomiarów – Metody pomiaru jakości energii [4],
- Norma PN-EN 61000-4-7, Metody badań i pomiarów – Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznych i interharmonicznych oraz stosowanych do tego celu przyrządów pomiarowych dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń [5].

W **Rozporządzeniu** [2] wyszczególniono dopuszczalne, wyrażone względnie, wartości graniczne harmonicznych napięcia zasilającego u_h oraz współczynnika odkształcenia harmonicznymi napięcia zasilającego THD definiując w następujący sposób:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2} \quad (6)$$

nie definiując wielkości u_h . W literaturze względne wartości harmonicznych u_h określane są jako iloraz wartości skutecznej danej harmonicznej i wartości skutecznej pierwszej harmonicznej lub wartości skutecznej napięcia.

Rozporządzenie specyfikuje wartości graniczne dla poszczególnych harmonicznych (do 40-jej włącznie) oraz współczynnika THD .

Norma PN-EN 50160 określa w p. 1.3.21 następujące wielkości:

- harmoniczna napięcia: napięcie sinusoidalne o częstotliwości równej całkowitej krotności częstotliwości podstawowej napięcia zasilającego. Harmoniczne napięcia mogą być określane:
 - indywidualnie, przez ich względną amplitudę (u_h) odniesioną do napięcia składowej podstawowej U_1 , gdzie h jest rzędem harmonicznej,
 - łącznie, na przykład przez całkowity współczynnik odkształcenia harmonicznymi THD , obliczany zgodnie z wyrażeniem (6).
- interharmoniczna napięcia: napięcie sinusoidalne o częstotliwości zawartej pomiędzy harmonicznymi, tj. częstotliwości niebędącej całkowitą krotnością częstotliwości składowej podstawowej.

Norma specyfikuje wartości graniczne dla 40-jej harmonicznej.

Norma PN-EN 61000-4-30 określa następujące wielkości:

- 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 interharmonicznej: każda częstotliwość, która nie jest całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej,
- podstawowy pomiar harmonicznych: zgodny z PN-EN 61000-4-7 dla 10-okresowych niezachodzących na siebie podgrup harmonicznych $C_{sg,n}$ z wykorzystaniem agregacji pomiarów,

- podstawowy pomiar interharmonicznych: zgodny z PN-EN 61000-4-7 dla 10-okresowych niezachodzących na siebie centrowanych podgrup interharmonicznych $C_{isg,n}$ z wykorzystaniem agregacji pomiarów,
- algorytm agregacji pomiarów: agregacje 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 2h” powinny być agregowane z dwunastu przedziałów 10-minutowych

Norma PN-EN 61000-4-7, określa pomiar harmonicznych i interharmonicznych w układzie przedstawionym na rysunku 1. Częstotliwość graniczna filtru antyaliasingowego musi zapewniać niezniekształcenie harmonicznych podlegających dalszej analizie (oczywiście nie jest to częstotliwość graniczna odpowiadająca tłumieniu -3dB lecz tłumieniu adekwatnemu do rozdzielczości przetwornika analogowo-cyfrowego). Częstotliwość próbkowania musi uwzględniać częstotliwość graniczną tego filtru. Wymagane prostokątne, zsynchronizowane ze zbroczem napięcia, okno pomiarowe dla dyskretnej transformaty Fouriera DFT o czasie $T_w = 10/f_c$. Okno Hanninga powinno być używane tylko w przypadku zgubienia synchronizacji. Czas okna pomiarowego T_w narzuca najniższą częstotliwość wyniku obliczeń DFT oraz rozdzielczość częstotliwościową Δf :

$$\Delta f = \frac{1}{T_w} = 5\text{Hz} \cdot (7)$$

Wartość czasu okna pomiarowego T_w wpływa na wyniki DFT.

Niewłaściwie dobrany czas okna pomiarowego skutkuje trudno porównywalnymi wynikami. Największa częstotliwość wyniku DFT nie może przekroczyć połowy częstotliwości próbkowania. Wygładzanie – filtracja dolnoprzepustowa za pomocą filtru pierwszego rzędu o stałej czasowej 1,5 s. Ocena zgodności z wymaganiami polega na porównaniu z obowiązującymi wartościami granicznymi. Obecnie zestawienie wartości granicznych dla poszczególnych harmonicznych i współczynnika THD zawiera aktualne Rozporządzenie Ministra Gospodarki [2].

Grupowanie i podgrupowanie harmonicznych

Komponent C_k – k -ty elementarny wynik DFT o częstotliwości f_k będącej całkowitą wielokrotnością rozdzielczości częstotliwości $f_k = k \cdot \Delta f$ (7).

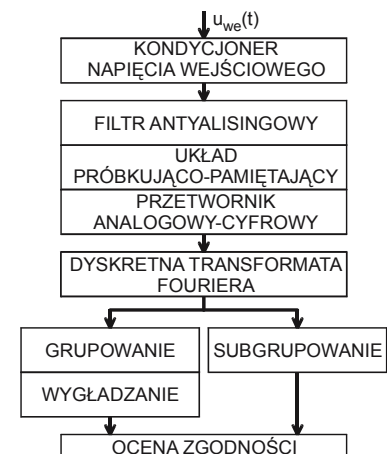
Wartość skuteczna harmonicznej h -tego rzędu określana jest na podstawie zależności:

$$G_h = C_{k=10h} \quad (8)$$

Wartość skuteczna k -tej interharmonicznej określana jest na podstawie zależności:

$$G_{i,k} = C_{k=10h+i} \quad (9)$$

gdzie: $i \neq 0$.

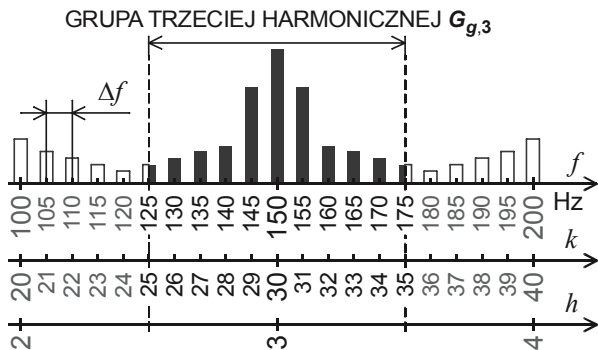


Rys. 1. Ogólna struktura układu pomiarowego
Fig. 1. General structure of the measuring instrument

Grupa harmoniczej h -tego rzędu określana jest na podstawie zależności składającej się z h -tej harmoniczej i pięciu sąsiednich interharmonicznych:

$$G_{g,h}^2 = \frac{C_{k=10h-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k=10h+i}^2 + \frac{C_{k=10h+5}^2}{2}. \quad (10)$$

Na rysunku 2 przedstawiono graficzną interpretację grupy harmoniczej dla $h=3$.

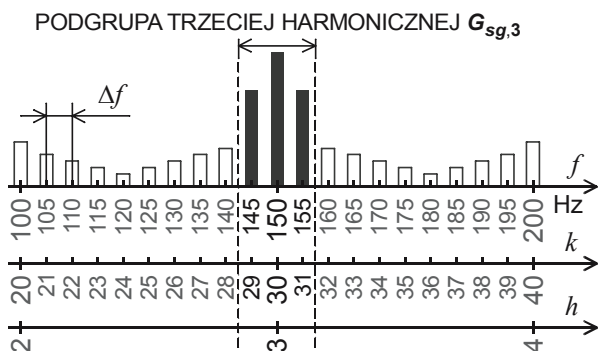


Rys. 2. Graficzna interpretacja grupy harmoniczej dla $h=3$
Fig. 2. Graphical interpretation of harmonic group for $h=3$

Podgrupa harmoniczej h -tego rzędu określana jest na podstawie zależności składającej się z h -tej harmoniczej i najbliższych sąsiednich interharmonicznych:

$$G_{sg,h}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k=10h+i}^2. \quad (11)$$

Na rysunku 3 przedstawiono graficzną interpretację podgrupy harmoniczej dla $h=3$.



Rys. 3. Graficzna interpretacja podgrupy harmoniczej dla $h=3$
Fig. 3. Graphical interpretation of harmonic subgroup for $h=3$

Współczynnik odkształcenia harmonicznymi THDS wyznaczany z wykorzystaniem podgrupowania

$$THDS = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{G_{sg,h}}{G_{sg,1}} \right)^2}. \quad (12)$$

gdzie: H – ilość składników sumowania (np. 25, 40)

4. Jak mierzyć harmoniczne napięcia ?

Podstawowym dokumentem specyfikującym miary jakości energii elektrycznej jest aktualne Rozporządzenie [2]. W dokumencie tym brak opisu pomiaru poszczególnych harmonicznych i współczynnika THD napięcia. Czy to oznacza, że

dowolny sposób pomiaru, zgodny z wymaganiami teoretycznymi dla analizy widmowej sygnałów, jest prawidłowy ?

Ze względu na brak wskazania w Rozporządzeniu źródeł informacji precyzujących pomiar harmonicznych korzysta się z norm tematycznie spójnych z oceną jakości energii elektrycznej i pomiarem wielkości opisujących miary jakości. Norma PN-EN 50160 wymienia wartości graniczne nie precyzując pomiaru harmonicznych. Jak mierzyć harmoniczne napięcia można wnioskować na podstawie norm PN-EN 61000-4-30 i PN-EN 61000-4-7:

- PN-EN 61000-4-30 określa:

- że podstawowy pomiar harmonicznych powinien być zgodny z PN-EN 61000-4-7 dla 10-okresowych nie zachodzących na siebie podgrup harmonicznych $G_{sg,n}$,
- że wartość harmonicznej U_h jest wynikiem uśredniania dla agregacji kolejnych wartości podgrup harmonicznych $G_{sg,n}$ w zadanym okresie analizy,

$$U_h = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^P G_{sg,h,p}^2}{P}}, \quad (13)$$

gdzie: P - ilość podgrup harmonicznych podlegających agregacji w zadanym okresie analizy,

- PN-EN 61000-4-7 określa:

- że wartości podgrup harmonicznych wyznaczane są zgodnie z równaniem (11),
- trzy zależności na współczynnik THD , jednak można domniemywać na podstawie analogii do wyznaczania wartości poszczególnych harmonicznych, że wartość współczynnika THD powinna być wyznaczana na podstawie wyniku podstawowego pomiaru harmonicznych czyli zgodnie z zależnościami (11, 12).

5. Badanie toru analizy widmowej analizatora jakości energii elektrycznej

Badanie toru analizy widmowej analizatora jakości energii elektrycznej powinno zawierać m.in. następujące etapy:

- ocenę charakterystyki amplitudowej w zadanym przedziale częstotliwości,
- ocenę charakterystyki fazowej w zadanym przedziale częstotliwości - w przypadku wykorzystaniu wyników DFT do obliczania mocy lub wizualizacji przebiegów czasowych na podstawie odwrotnej DFT,
- kontrola występowania aliasingu,
- ocenę grupowania i podgrupowania harmonicznych.

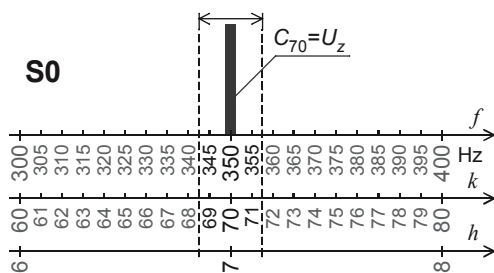
Trzy pierwsze punkty są klasycznymi problemami opisywanymi w literaturze z zakresu teorii sygnałów. W dalszej części będzie zarysowana metodologia oceny grupowania i podgrupowania harmonicznych.

5.1. Sygnały testowe do oceny grupowania i podgrupowania

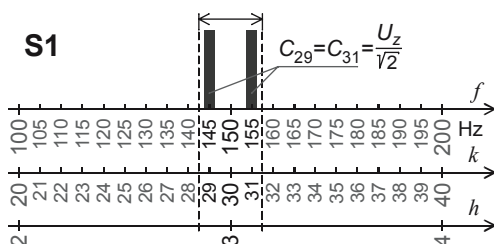
Prawidłowość grupowania i podgrupowania harmonicznych można ocenić odpowiednio składając harmoniczne i interharmoniczne. W tabeli 1 zestawiono przykładowe sygnały testowe S0, S1, S2, S5 i S6 dla trzeciej harmonicznej. Zaproponowano takie wartości skuteczne komponentów C_k , aby wartość skuteczna harmonicznej, grupy i podgrupy harmonicznej wynosiła U_z . Ocena grupowania i podgrupowania polega na porównaniu wyników pomiarów z wartościami teoretycznymi z tabeli 1. Jeżeli w dokumentacji analizatora jakości brak opisu pomiaru harmonicznych i współczynnika THD na podstawie sygnałów testowych, można zidentyfikować czy stosowane jest grupowanie lub podgrupowanie.

Tab. 1. Zestawienie przykładowych sygnałów testowych dla $h = 3$
 Tab. 1. Combination of selected testing signal for $h = 3$

Komponent	S0	S1	S2	S5	S6
C_{24}	0	0	0	0	$U_z/\sqrt{2}$
C_{25}	0	0	0	U_z	0
C_{28}	0	0	$U_z/\sqrt{2}$	0	0
C_{29}	0	$U_z/\sqrt{2}$	0	0	0
C_{30}	U_z	0	0	0	0
C_{31}	0	$U_z/\sqrt{2}$	0	0	0
C_{32}	0	0	$U_z/\sqrt{2}$	0	0
C_{35}	0	0	0	U_z	0
C_{36}	0	0	0	0	$U_z/\sqrt{2}$
G_3	U_z	0	0	0	0
$G_{sg,3}$	U_z	U_z	0	0	0
$G_{g,3}$	U_z	U_z	U_z	U_z	0



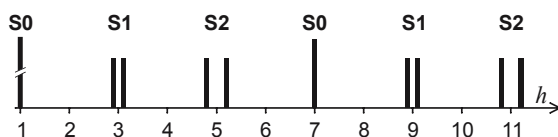
Rys. 4. Sygnał testowy S0 dla $k = 70$
 Fig. 4. Testing signal S0 for $k = 70$



Rys. 5. Sygnał testowy S1 dla $k = 29$ i 31
 Fig. 5. Testing signal S1 for $k = 29$ and 31

5.2. Ocena pomiaru harmoniczných napięcia wybranymi analizatorami

Ocenę pomiaru harmoniczných napięcia przeprowadzono z wykorzystaniem następujących sygnałów: S0 dla $h = 1$ i $h = 7$, S1 dla $h = 3$ i $h = 9$ oraz S2 dla $h = 5$ i $h = 11$. Na rysunku 6 przedstawiono wypadkowe widmo amplitudowe sygnału testowego.



Rys. 6. Wypadkowe widmo amplitudowe sygnału testowego
 Fig. 6. Spectrum amplitude of testing signal

W tabeli 2 przedstawiono przewidywane wyniki pomiarów harmoniczných w zależności od algorytmu pomiaru. Wartość skuteczną harmoniczných h -tego rzędu G_h (8), grupę harmoniczných $C_{g,h}$ (10) i podgrupę harmoniczných $C_{sg,h}$ (11) wyrażono względnie w odniesieniu do wartości skuteczných pierwszej harmoniczných G_1 . Ze względu na wyniki oceny analizatory jakości energii elektryczných renomowanych firm oznaczono umownie: A1 i A2. W dwóch ostatnich wierszach zamieszczono wyniki pomiarów zarejestrowanych w badanych analizatorach. Do generacji

sygnału testowego z rysunku 6 wykorzystano generator 6811B firmy Agilent [6].

Tab. 2. Zestawienie wartości teoretycznych i wyników pomiarów harmoniczných
 Tab. 2. Combination of theoretical values and harmonic measurements results

Rząd harmoniczných h	1	3	5	7	9	11
G_h - wartość skuteczných w %	100	0	0	5	0	0
$G_{g,h}$ - grupa harmoniczných w %	100	5	5	5	5	5
$G_{sg,h}$ - podgrupa harmoniczných w %	100	5	0	5	5	0
Wynik pomiaru A1 w %	100,0	1,0	0,3	4,9	0,9	0,3
Wynik pomiaru A2 w %	100,0	5,0	5,0	4,9	4,8	4,8

Różnica pomiędzy wynikami pomiarów analizatorem A1 i wartościami teoretycznymi wskazuje na brak zgodności z aktualną normą PN-EN 61000-4-7. Wykryta różnica spowodowana jest niezgodnością czasu okna pomiarowego T_{wA1} badanego analizatora z aktualnymi wymaganiami normatywnymi ($T_{wA1} = 320 \text{ ms} \neq 200 \text{ ms}$). Ocena pomiaru harmoniczných tego analizatora wymagałaby zmiany rozdzielczości częstotliwościowej $\Delta f = 50/16 = 3\frac{1}{8} \text{ Hz}$ sygnałów testowych. W wyniku wartości rozdzielczości Δf uległaby zmianie ilość interharmoniczných pomiędzy sąsiednimi harmonicznymi z 9 do 15. Prowadziłoby do wątpliwości przy stosowaniu zależności określającej grupę harmoniczných (10). Przeprowadzono badania symulacyjne dla okna pomiarowego $T_{wA1} = 320 \text{ ms}$. Na podstawie porównania wyników symulacji i pomiarów nie stwierdzono wykorzystania algorytmów grupowania i podgrupowania, jak również zgodności wartości skuteczných harmoniczných w analizatorze A1. Porównanie wyników pomiarów analizatorem A2 i wartości teoretycznych grup harmoniczných sugeruje zastosowanie algorytmu grupowania.

6. Podsumowanie

W pracy zamieszczono przegląd dokumentów specyfikujących pomiar harmoniczných napięcia w sieci elektroenergetycznej: aktualnego Rozporządzenia oraz następujących norm: PN-EN 50160, 61000-4-30 i 61000-4-7. Podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, jak mierzyć harmoniczne. Zwrócono uwagę na etapy pomiaru harmoniczných niewystępujące w klasycznych podręcznikach podstaw elektrotechniki i teorii sygnałów, w tym m.in. na grupowanie, podgrupowanie i agregację wyników pomiarów. Przedstawiono wyniki pomiarów dwóch analizatorów jakości energii elektryczných. Na podstawie porównania wyników pomiarów z wartościami określonymi analitycznie stwierdzono brak spójności z zaleceniami normatywnymi.

7. Literatura

- [1] Szabat J.: Podstawy teorii sygnałów. WKiŁ, 1990, Warszawa.
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dn. 20.12.2004 w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji tych sieci. Dz. U. nr 2 z dn. 6.01.2005, poz. 6.
- [3] PN-EN 50160, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
- [4] PN-EN 61000-4-30, Metody badań i pomiarów, Metody pomiaru jakości energii.
- [5] PN-EN 61000-4-7, Metody badań i pomiarów – Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmoniczných i interharmoniczných oraz stosowanych do tego celu przyrządów pomiarowych dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń.
- [6] User's Guide AC Power Solutions Agilent Models 6811B, 6812B, and 6813B, Agilent, 2000.