

Badanie właściwości metrologicznych analizatora jakości energii elektrycznej z uwzględnieniem zjawiska przecieku widma

Streszczenie. W pracy zaprezentowano przykładowe wyniki pomiarów, wartości skutecznej napięcia oraz współczynnika odkształcenia THD, wybranymi analizatorami jakości energii elektrycznej na skonstrowanym stanowisku pomiarowym. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących problemu przecieku widma w procesie oceny jakości energii elektrycznej. Zaprezentowano metrologiczną interpretację uzyskanych wyników pomiarów oraz sformułowano wnioski końcowe.

Abstract. Examples of the results, RMS voltage values and distortion factor THD, of testing a selected power quality analysers in a designed measuring system are presented in the paper. The paper presents the results of experimental research on the problem of spectrum leakage in the process of power quality analysis. Metrological interpretation of the contained results and formulations of conclusions were presented in the paper. (Examination of metrological properties of power quality analyser taking into account the phenomenon of spectrum leakage).

Słowa kluczowe: analizator jakości energii elektrycznej, budżet niepewności, okno pomiarowe, przeciek widma.

Keywords: power quality analyser, uncertainty budget, measurement window, spectrum leakage.

Wstęp

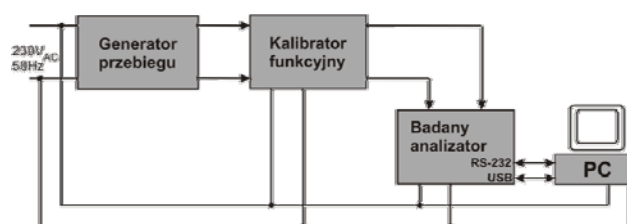
Ocena jakości energii elektrycznej jest złożonym zadaniem pomiarowym, wymagającym wykorzystania systemu o odpowiednich właściwościach metrologicznych. Jakość energii elektrycznej (ang. Power quality) można opisywać różnymi miarami. Dobór miar jest uzależniony od celu ich wykorzystania, możliwości implementacyjnych i zgodności z obowiązującym prawem. Przystępując do oceny jakości energii elektrycznej należy określić i zdefiniować wielkości, które będą podlegały pomiarom. Wielkości te przedstawiono w dokumencie [1]. Dwie spośród tych wielkości: wartość skuteczna wybranych harmonicznymi napięcia U_h , oraz współczynnik odkształcenia harmonicznymi napięcia zasilającego THD są związane z odkształceniami przebiegów napięcia w rozpatrywanych układach pomiarowych. Pod pojęciem składowej harmonicznej rozumieć należy, każdą składową o częstotliwości będącej całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej danego przebiegu. Pomiar oraz rejestracja parametrów służących do oceny jakości energii elektrycznej są wykonywane z wykorzystaniem przyrządów pomiarowych zwanych analizatorami jakości energii elektrycznej. Wyniki pomiarów, zarejestrowane z wykorzystaniem tych przyrządów, mogą być pomocne do diagnozowania stanu sieci energetycznej np. wykrywania odbiorników niespokojnych [2-5].

Bardzo istotną kwestią jest ocena niepewności wyników pomiarów uzyskanych przy wykorzystaniu badanego analizatora. Końcowy wynik pomiaru jest kompletny tylko wówczas, kiedy zawiera zarówno wartość wielkości mierzonej, jak i niepewność wyniku pomiaru związaną z tą wartością. Przyjmuje się, zgodnie z dokumentem [6], że niepewność pomiaru jest to nieujemny parametr charakteryzujący rozproszenie wartości wielkości przyporządkowany do menzurandu, obliczony na podstawie uzyskanej informacji. Dokonano oceny właściwości metrologicznych wybranych analizatorów jakości energii elektrycznej. Przeprowadzono analizę niepewności, uzyskanych wyników pomiarów, poprzez wyznaczenie budżetów niepewności dla przykładowych sygnałów testowych. Badania zrealizowano na zaprojektowanym i skonstrowanym stanowisku pomiarowym. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących problemu przecieku widma w procesie oceny jakości energii elektrycznej. W części eksperymentalnej wyznaczono, w sposób analityczny, wartości poszczególnych harmonicznymi, wykorzystując rozwinięcie funkcji

w trygonometryczny szereg Fouriera. Dzięki temu wyznaczono wartości błędów wynikających ze zjawiska przecieku widma.

Badanie analizatorów jakości energii elektrycznej

Badania wybranych analizatorów przeprowadzono na zaprojektowanym i skonstrowanym stanowisku pomiarowym, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego do badań analizatorów jakości energii elektrycznej

Podana w świadectwie wzorcowania wartość granicznego błędu odtwarzania częstotliwości generatora, łącznie z niepewnością jego wyznaczenia, dla przebiegu trójkątnego wynosi $(198 \pm 68) \cdot 10^{-6}$ Hz. Wartość błędu granicznego dla rozpatrywanych wartości skutecznych sygnału wynosi $\Delta = (0,042\% W_w + 0,0005\% W_z)$, gdzie W_w oznacza wartość wskazaną, natomiast W_z oznacza wartość zakresu pomiarowego. Tak wygenerowany sygnał jest następnie podawany na badany analizator. Ze względu na czasochłonność przeprowadzanych badań poddano weryfikacji wybrane wielkości: wartość skuteczną napięcia oraz rozkład składowych harmonicznymi. Jedną z funkcji testowych był sygnał okresowy $u(t)$, który można przedstawić w postaci trygonometrycznego szeregu Fouriera, zgodnie z ogólnie znanymi zależnościami. W praktyce pomiarowej układów elektroenergetycznych, w zależności od typu analizatora, wykorzystuje się zazwyczaj pierwsze kilkanaście lub kilkadziesiąt składników.

Wszystkie pomiary przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, dla ściśle określonych wartości temperatury otoczenia, oraz wilgotności względnej. We wszystkich pomiarach błędy pomiaru wyznaczono jako różnicę pomiędzy wynikiem pomiaru a wartością wielkości odniesienia, które zamieszczono w tabelach 1, 2 oraz 3.

W praktyce, do wyznaczania wartości błędów pomiarów, często wykorzystuje się wirtualne przyrządy pomiarowe. Przykład takiego przyrządu przedstawiono w pracy [7]

Do oceny dokładności pomiaru wartości skutecznej napięcia oraz zawartości harmonicznych wybranym analizatorem jakości energii elektrycznej wykorzystano różne sygnały testowe. Badany analizator jakości energii elektrycznej wzorcowano dwuetapowo. Pierwszy etap polegał na wzorcowaniu miernika sygnałem odkształconym o określonej wartości skutecznej. Drugi etap polegał na wzorcowaniu miernika sygnałem sinusoidalnym o tej samej wartości skutecznej co sygnał odkształcony. W trakcie badań wykorzystano dwa rodzaje przebiegów odkształconych:

- przebieg o kształcie trójkątnym,
- przebieg złożony z sumy dwóch sygnałów: harmonicznej podstawowej oraz wybranej wyższej harmonicznej.

Przebieg trójkątny można rozwinąć w szereg Fouriera wykorzystując zależność (1):

$$(1) u(t) = \frac{8U_m}{\pi^2} \left(\sin \omega_0 t - \frac{1}{3^2} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5^2} \sin 5\omega_0 t - \dots \right)$$

gdzie: U_m oznacza amplitudę sygnału, pulsacja $\omega_0 = 2\pi/T$.

Wzorcowanie miernika sygnałem sinusoidalnym, dla którego wartość oczekiwana zawartości harmonicznych wynosi zero, miało na celu sprawdzenie tzw. „zera” analizatora.

Dla przebiegu odkształconego złożonego z sumy dwóch sygnałów, harmonicznej podstawowej oraz wybranej wyższej harmonicznej, harmoniczna podstawowa miała wartość skuteczną równą 230 V, natomiast wyższe harmoniczne miały różne wartości w zależności od konkretnego badanego egzemplarza analizatora. Badaniom poddano grupę ponad 50 egzemplarzy analizatorów harmonicznych typu HA-2000, natomiast w pracy przedstawiono wyniki badań dla wybranego egzemplarza. W tabeli 1 zaprezentowano przykładowe wyniki badań dla sygnału testowego, odkształconego jedną składową harmoniczną. W tym konkretnym przypadku, harmoniczna podstawowa miała wartość skuteczną równą 230 V, natomiast wyższe harmoniczne miały wartość 4,6 V, co stanowi 2 % wartości harmonicznej podstawowej. Pomiaru były wykonywane 10 krotnie, a jako wartość wielkości zmierzonej przyjęto średnią arytmetyczną z serii wyników.

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów analizatora HA-2000 dla sygnału odkształconego z jedną składową harmoniczną

Rząd harmonicznej	Pomiar THD Sygnał odkształcony jedną harmoniczną			
	Wartość wielkości zmierzona	Wartość wielkości odniesienia	Błąd pomiaru	Niepewność pomiaru
	%	%	%	%
2	2,06	2,000	0,06	1,29
3	2,01	2,000	0,01	
4	1,96	2,000	-0,04	
5	1,99	2,000	-0,01	

W tabeli 2 przedstawiono zestawienie wyników pomiarów, dla badanego analizatora HA-2000, dla wymuszenia sygnałem sinusoidalnym dla trzech wartości napięcia, dla punktów kontrolnych U_k równych odpowiednio: 100 V, 230 V oraz 400 V.

W tabeli 3 zestawiono uzyskane przykładowe wyniki pomiarów, procentowej zawartości poszczególnych, nieparzystych harmonicznych dla trójkątnego sygnału testowego. Wartości niepewności w tabelach 1, 2 oraz 3 wyznaczono zgodnie z dokumentem [8].

Tabela 2. Zestawienie wyników pomiarów analizatora HA-2000 dla sygnału sinusoidalnego

Pomiar napięcia sinusoidalnego dla $f = 50$ Hz			
Wartość wielkości zmierzona	Wartość wielkości odniesienia	Błąd pomiaru	Niepewność pomiaru
V	V	V	V
99,48	100,00	-0,52	0,08
229,94	230,00	-0,06	0,16
399,40	400,00	-0,60	0,29

Tabela 3. Zestawienie wyników pomiarów analizatora HA-2000 dla trójkątnego sygnału testującego

Rząd harmonicznej	Procentowa zawartość harmonicznych w sygnale odkształconym dla wartości THD = 12,113 %			
	Wartość wielkości zmierzona	Wartość wielkości odniesienia	Błąd pomiaru	Niepewność pomiaru
	%	%	%	%
3	11,1	11,1111	-0,012	0,08
5	3,9	4,0000	-0,10	
7	2,0	2,0408	-0,05	
9	1,2	1,2346	-0,04	
11	0,8	0,8264	-0,03	
13	0,6	0,5917	0,01	
15	0,5	0,4444	0,06	
17	0,3	0,3460	-0,05	
19	0,3	0,2770	0,03	

W celu wyznaczenia wartości niepewności wyniku pomiaru, należy prawidłowo określić równanie pomiaru, które uwzględnia wszystkie czynniki mające wpływ na końcowy wynik pomiaru. W przypadku wzorcowania analizatora sygnałem odkształconym, o określonej wartości skutecznej, równanie na błąd pomiaru $\Delta_{THD_{odk}}$ przyjmuje postać daną zależnością (2):

$$(2) \Delta_{THD_{odk}} = |W_{zmTHD_{odk}} - W_{odnTHD_{odk}}| + \delta\Delta_{r_{odk}} - \delta D_{odk},$$

gdzie $W_{zmTHD_{odk}}$ oznacza wartość wielkości zmierzonej, $W_{odnTHD_{odk}}$ wartość odniesienia, $\delta\Delta_{r_{odk}}$ wartość związaną z rozdzielczością wskazań analizatora w trakcie pomiaru sygnału odkształconego, δD_{odk} wartość związaną z błędem granicznym wzorca odniesienia w trakcie pomiaru sygnału odkształconego.

Dla wzorcowania analizatora sygnałem sinusoidalnym, równanie na błąd pomiaru $\Delta_{THD_{sin}}$ przyjmuje postać daną zależnością (3):

$$(3) \Delta_{THD_{sin}} = |W_{zmTHD_{sin}} - W_{odnTHD_{sin}}| + \delta\Delta_{r_{sin}} - \delta D_{sin},$$

gdzie $W_{zmTHD_{sin}}$ oznacza wartość wielkości zmierzonej, $W_{odnTHD_{sin}} = 0$ wartość odniesienia, $\delta\Delta_{r_{sin}}$ wartość związaną z rozdzielczością wskazań analizatora w trakcie pomiaru sygnału sinusoidalnego, δD_{sin} wartość związaną z błędem granicznym wzorca odniesienia w trakcie pomiaru sygnału sinusoidalnego. W końcowym zapisie wyniku pomiaru powinna się znaleźć zarówno wartość wielkości mierzonej, jak również niepewność wyniku pomiaru związana z tą wartością. Szczegółowy opis wyznaczania niepewności, metodą typu A oraz B, można znaleźć w dokumencie [8].

Złożona niepewność standardowa wyznaczenia błędu pomiaru $u_c(\Delta_{THD_{odk}})$ analizatora dla sygnałów odkształconych dana jest zależnością (4):

$$(4) u_c^2(\Delta_{THD_{odk}}) = c_1^2 \cdot u^2(W_{zmTHD_{odk}} - W_{odnTHD_{odk}}) + c_2^2 \cdot u^2(\delta\Delta_{r_{odk}}) + c_3^2 \cdot u^2(W_{zmTHD_{sin}} - W_{odnTHD_{sin}}) + c_4^2 \cdot u^2(\delta\Delta_{r_{sin}}) + c_5^2 \cdot u^2(\delta D),$$

gdzie: $c_1 - c_5$ oznaczają współczynniki wrażliwości, natomiast δD oznacza wartość związaną z błędem granicznym wzorca odniesienia, która jest wyznaczona jako suma geometryczna wartości δD_{odk} i δD_{sin} . Wartości współczynników wrażliwości wyznaczono jako pochodne cząstkowe funkcji pomiaru $\Delta_{THD_{odk}}$ względem poszczególnych zmiennych danych równaniem (4). Po przeprowadzeniu obliczeń otrzymujemy wyrażenie na wartość niepewności złożonej u_c dane zależnością (5):

$$(5) \quad u_c(\Delta_{THD_{odk}}) = u^2(W_{zmTHD_{odk}} - W_{odnTHD_{odk}}) + u^2(\delta\Delta_{r_{odk}}) + u^2(W_{zmTHD_{sin}} - W_{odnTHD_{sin}}) + u^2(\delta\Delta_{r_{sin}}) + u^2(\delta D).$$

Przy szacowaniu niepewności pomiaru badanego analizatora należy uwzględnić następujące czynniki:

- niepewność standardową pomiaru różnicy wyniku pomiaru i wartości wielkości odniesienia dla sygnału odkształconego $W_{zmTHD_{odk}} - W_{odnTHD_{odk}}$,

- niepewność standardową pomiaru związaną z rozdzielczością wskazań analizatora w trakcie pomiaru sygnału odkształconego $\delta\Delta_{r_{odk}}$,

- niepewność standardową pomiaru różnicy wyniku pomiaru i wartości wielkości odniesienia dla sygnału sinusoidalnego $W_{zmTHD_{sin}} - W_{odnTHD_{sin}} = W_{zmTHD_{sin}}$,

Ponieważ wartość oczekiwana $W_{odnTHD_{sin}}$ wynosi zero, dokonuje się randomizacji na zmienną losową e_{THD} z niepewnością pomiaru $u(e_{THD})$. Niepewność standardowa pomiaru, przy założeniu rozkładu normalnego, zgodnie z prawem propagacji niepewności, dana jest zależnością (6):

$$(6) \quad u(e_{THD}) = \sqrt{(W_{zmTHD_{sin}})^2 + u^2(W_{zmTHD_{sin}})}.$$

Tak wyznaczona niepewność związana jest z niestabilnością wskazań badanego analizatora dla sygnału sinusoidalnego. Złożona niepewność standardowa pomiaru Δ_{THD} sygnału odkształconego wyraża się zależnością (7):

$$(7) \quad u_c(\Delta_{THD_{odk}}) = u^2(W_{zmTHD_{odk}} - W_{odnTHD_{odk}}) + u^2(\delta\Delta_{r_{odk}}) + u^2(e_{THD}) + u^2(\delta\Delta_{r_{sin}}) + u^2(\delta D).$$

- niepewność standardową pomiaru związaną z rozdzielczością wskazań analizatora w trakcie pomiaru sygnału sinusoidalnego $\delta\Delta_{r_{sin}}$,

- niepewność standardową związaną z błędem granicznym wzorca odniesienia δD .

Niepewności standardowe związane z rozdzielczością wskazań analizatora, przy założeniu rozkładu prostokątnego, można wyznaczyć ze wzoru (8):

$$(8) \quad u(\delta\Delta_r) = \frac{\Delta_r}{2\sqrt{3}},$$

gdzie Δ_r określa rozdzielczość badanego analizatora.

Wszystkie wymienione powyżej składowe niepewności rozszerzonej zostały wyznaczone i uwzględnione w końcowym budżecie niepewności. Niepewność rozszerzona wyniku pomiaru została wyznaczona zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumencie [9]. Jej wartość wyznaczono na podstawie prawa propagacji niepewności, przy czym w analizie uwzględniono rozrzut wyników pomiarów, rozdzielczość badanego analizatora, jak również niedokładności kalibratora oraz generatora przebiegu.

Podane wartości niepewności stanowią niepewność rozszerzoną przy założonym poziomie ufności równym $\approx 95\%$ i współczynniku rozszerzenia $k = 2$.

W tabeli 4 przedstawiono przykładowy budżet niepewności dla przebiegu złożonego z sumy dwóch sygnałów: harmonicznej podstawowej oraz wybranej wyższej harmonicznej.

Tabela 4. Budżet niepewności analizatora HA-2000 dla sygnału z wybraną wyższą harmoniczną

Symbol wielk.	Estymata wielkości	Niepew. stand.	Rozkład prawd.	Współ. wrażliw.	Udział w niepew. złożonej
$W_{zm} - W_{od}$	0,0600	0,0163	norm.	1	0,0163
e_{THD}	0,0000	0,6416	norm.	1	0,6416
$\delta\Delta_r$	0,0000	0,0290	prost.	1	0,0290
δD	0,0000	0,0602	prost.	-1	0,0602
Δ_{THD}	0,0600	-	-	-	0,6456

W analogiczny sposób wyznaczono budżety niepewności dla danych pomiarowych umieszczonych w tabelach 2 i 3. Uwzględnienie wszystkich składowych w budżecie niepewności pozwoliło na określenie, które niepewności składowe mają największy udział w niepewności złożonej, a zatem wskazanie kierunków doskonalenia pomiaru, które będą prowadzić do istotnego zmniejszenia niepewności złożonej.

Zjawisko przecieku widma

Do analizy harmonicznych powszechnie stosowany jest algorytm szybkiej transformaty Fouriera (FFT).

Pod pojęciem okna czasowego należy rozumieć funkcję $w(n)$ opisującą sposób pobierania próbek sygnału o skończonym przedziale wartości różnych od zera. Zakładając, że obserwowany jest pewien sygnał $u(n)$, wtedy wynikiem obserwacji z wykorzystaniem okna czasowego będzie sygnał $g(n)$ dany zależnością (9):

$$(9) \quad g(n) = u(n) \cdot w(n).$$

Zjawisko przecieku widma jest ściśle powiązane z oknem czasowym, czyli oknem w którym dokonywany jest pomiar. Występuje ono w przypadku, w którym długość okna pomiarowego nie jest całkowitą krotnością okresu badanego sygnału. Transformata iloczynu dwóch funkcji w dziedzinie czasu, jest splotem tych funkcji w dziedzinie częstotliwości. Efektem takiej operacji jest pojawienie się listków bocznych sygnału badanego. W przypadku, gdy długość okna pomiarowego nie będzie całkowitą wielokrotnością okresu podstawowego sygnału badanego, w wyniku pojawienia się listków bocznych sygnału badanego, nastąpi poszerzenie prążków widma. Efekt ten nazywany jest zjawiskiem przecieku widma. Aby zminimalizować efekt takiego zjawiska można zastosować inne okna pomiarowe niż prostokątne o przebiegu łagodnie zanikającym na krańcach, które zapewnią stłumienie sygnałów na krańcach okna. Zagadnienie przecieku widma dla analizatorów klasy A, wraz z wynikami badań eksperymentalnych i symulacyjnych jest przedstawione w pracy [10]. Problematyka wyznaczania wartości harmonicznych, oraz związanych z tym błędów, dla różnych wartości częstotliwości f , jest złożonym zadaniem pomiarowym. Poruszane zagadnienia są przedmiotem szereg publikacji np. [11-13].

W trakcie badań eksperymentalnych, dokonano pomiaru wyższych harmonicznych napięcia, uwzględniając zjawisko przecieku widma, w zakresie dopuszczalnych zmian częstotliwości sieci.

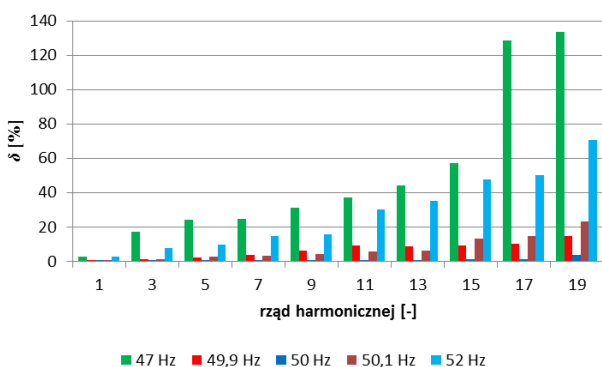
Badania wykonano dla następujących wartości częstotliwości sygnału badanego:

- 47 Hz i 52 Hz, gdyż są to skrajne dopuszczalne wartości częstotliwości napięcia sieci w czasie całego tygodnia,
- 49,9 Hz i 50,1 Hz, gdyż są to skrajne wartości odchylenia częstotliwości jakie wynikają z rozkładu prawdopodobieństwa wahań tego parametru spotykanych w praktyce [14],
- 50 Hz, gdyż jest to pożądana wartość częstotliwości, będąca poziomem odniesienia.

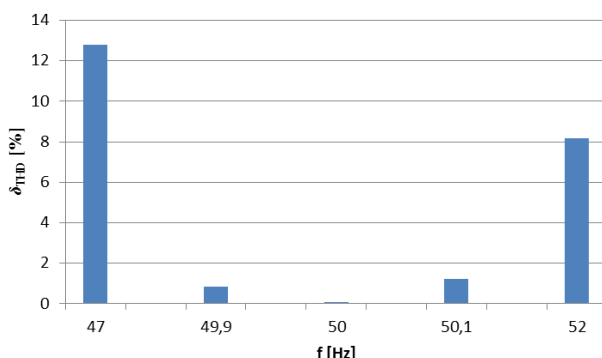
Dla określenia problemu przecieku widma wyznaczono błędy w odniesieniu do miary indywidualnej a) oraz do miary łącznej b) dane zależnością (10)

$$(10) \quad a) \quad \delta = \frac{|U_a - U_F|}{U_F} \quad b) \quad \delta_{THD} = \frac{|THD_a - THD_F|}{THD_F},$$

gdzie: U_a oznacza wartość skuteczną poszczególnej harmonicznej zmierzoną za pomocą analizatora, U_F jest wartością skuteczną poszczególnej harmonicznej wyznaczoną za pomocą rozwinięcia funkcji w trygonometryczny szereg Fouriera, THD_a oznacza wartość współczynnika THD wyznaczoną przez badany analizator, zaś THD_F jest wartością współczynnika THD wyznaczoną na podstawie rozwinięcia funkcji w trygonometryczny szereg Fouriera. Na podstawie wyników pomiarów, dla sygnału trójkątnego, wyznaczono wartości błędów względnych δ dla miary indywidualnej, oraz δ_{THD} dla miary łącznej. Graficzną interpretację wyznaczonych błędów przedstawiono na rysunkach 2 oraz 3.



Rys. 2. Rozkład wartości błędów δ poszczególnych nieparzystych harmonicznych dla różnych wartości częstotliwości dla sygnału trójkątnego



Rys. 3. Rozkład wartości błędów δ_{THD} w zależności od częstotliwości badanego sygnału f dla przebiegu trójkątnego

Podsumowanie

W pracy dokonano oceny właściwości metrologicznych wybranych analizatorów jakości energii elektrycznej, przy czym badania przeprowadzono na reprezentatywnej partii

ponad 50 egzemplarzy takich przyrządów. Na opisanym stanowisku przeprowadzono szereg badań wartości skutecznej napięcia oraz współczynnika odkształcenia THD, z wykorzystaniem wybranych sygnałów testowych.

Określono równanie pomiaru, które uwzględni wszystkie czynniki mające wpływ na końcowy wynik pomiaru. Umożliwiło to wyznaczenie wszystkich składowych niepewności standardowych, wyznaczonych zarówno metodą typu A i B.

Wyznaczone wartości niepewności pomiarów dla przykładowych sygnałów testowych, dla przebadanych analizatorów, są mniejsze niż wartości niepewności deklarowane przez producentów tych urządzeń pomiarowych.

Analizując zjawisko przecieku widma, na podstawie przedstawionych wyników, można sformułować następujące wnioski:

- wartości błędów δ wynikających ze zjawiska przecieku widma, znacząco wzrastają dla wyższych harmonicznych,
- wartości błędów δ_{THD} zaczynają być widoczne już przy niewielkich wahań częstotliwości.

Ten fakt może być szczególnie istotny w przypadku analizy sygnałów znacząco odkształconych i w konsekwencji prowadzić do błędnego wnioskowania.

Autor: dr inż. Przemysław Otomański, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: przemyslaw.otomanski@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku W sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.
- [2] Otomański P., The applications of the Power Quality Analyser to determine of parameters describing electric power quality, *Proc. of the 6th Int. Conf. on Measurement*, (2007), 288–291.
- [3] Otomański P., Wiczyński G., The usage of voltage and current fluctuation for localization of disturbing loads supplied from power grid, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87, (2011), 107–111.
- [4] Kuwałek P., The Application of Kernel Density Estimation for Aided the Process of Locating Sources of Voltage Fluctuations, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95, (2019), 70–74
- [5] Kuwałek P., AM Modulation Signal Estimation Allowing Further Research on Sources of Voltage Fluctuations, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 67, (2020), 6937–6945.
- [6] Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM), PKN, (2010).
- [7] Otomański P., Krawiecki Z., Odon A.: The application of the LabVIEW environment to evaluate the accuracy of alternating voltage measurements, *Journal of Physics: Conference Series*, 238, (2010).
- [8] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM 1995 with minor corrections, (2008).
- [9] EA-4/02 M:2013 Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration, European cooperation for Accreditation, (2013).
- [10] Kuwałek P., Otomański P., Wandachowicz K., Influence of the Phenomenon of Spectrum Leakage on the Evaluation Process of Metrological Properties of Power Quality Analyser, *Energies*, 13, (2020).
- [11] Jin T., Chen Z., Flesch R.C.C.: A novel power harmonic analysis method based on Nuttall-Kaiser combination window double spectrum interpolated FFT algorithm, *Journal of Electrical Engineering*, 68(6), (2017), 435–443.
- [12] Mindykowski J., Tarasiuk T.: Problems of power quality in the wake of ship technology development, *Ocean Engineering*, 107, (2015), 108–117.
- [13] Wen H., Teng Z., Wang Y., Hu X.: Spectral correction approach based on desirable sidelobe window for harmonic analysis of industrial power system, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 60(3), (2013), 1001–1010.
- [14] Polskie Sieci Elektroenergetyczne PSE, Zestawienie danych ilościowych dotyczących funkcjonowania krajowej sieci elektroenergetycznej KSE w 2018 roku, (2019).