

*ocena jakości energii elektrycznej,
systemy monitorowania jakości energii,
interoperacyjność, integracja systemów,
nowe wskaźniki jakości energii*

Beata KREDENC*, Tomasz SIKORSKI*

WYBRANE ZAGADNIENIA WSPÓŁCZESNEJ OCENY JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

W artykule opisano zagadnienia dotyczące rozwoju jakości energii elektrycznej oraz współczesnych zagadnień dotyczących tej tematyki. Przedstawiono rozwój zainteresowania problematyką w odniesieniu do współczesnych aspektów pracy systemu elektroenergetycznego z uwzględnieniem elementów technicznych, handlowych, a także bezpieczeństwa energetycznego. W tym świetle wskazano konieczność rozwoju systemowego monitorowania parametrów jakościowych oraz postulowano o kontynuację raportów benchmarkingowych. Jednocześnie wskazano na nowe wyzwania związane między innymi z rozszerzeniem zakresu częstotliwości zaburzeń jakości energii elektrycznej, stosowaniem narzędzi analizy sygnałów do celów analizy danych długoterminowych i wielopunktowych, lokalizacji źródeł zaburzeń. Jako dodatkowy aspekt wskazano na konieczność włączenia systemów monitorowania jakości energii elektrycznej w proces interoperacyjności elementów sieci elektroenergetycznych i integracji systemów sterowania i nadzoru. Dodatkowo omówiono problematykę rozszerzenia zakresu częstotliwości zaburzeń oraz propozycje wybranych nowych wskaźników jakości energii elektrycznej.

1. DEFINICJE I ROZWÓJ

Termin jakość energii elektrycznej został zapoczątkowany w latach 70. ubiegłego wieku. Samo słowo jakość oznacza poziom doskonalenia, jest zespołem cech wyróżniających daną rzecz. Znając powyższą definicję, można zająć się słowem energia elektryczna (będącą wynikiem pewnego procesu technologicznego) i połączyć wszystko w jedną całość. Jeśli o energii mówimy jak o produkcie, należy poddać ją pewnej ocenie i standaryzacji [2], [3], [13], [14], [30].

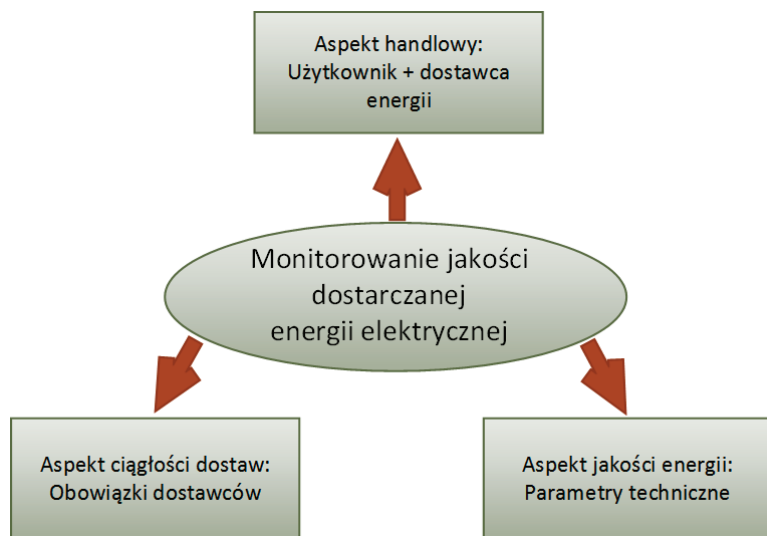
* Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e mail: tomasz.sikorski@pwr.edu.pl

Jakość energii elektrycznej jest pojęciem szeroko rozumianym. Współcześnie zagadnienie to rozumiane jest najczęściej jako:

- jakość zasilania – pojęcie powszechnie używane, najbardziej znane,
- niezawodność dostaw energii elektrycznej – pojęcie nawiązujące do ciągłości zasilania,
- jakość energii elektrycznej – nawiązujące do aspektów technicznych opisywanych przez różne parametry.

Istnieją różne powody tak dużego zainteresowania jakością energii elektrycznej, między innymi [3], [13]:

- urządzenia stały się bardziej wrażliwe na zakłócenia w napięciu zasilającym,
- przemysł stawia coraz to wyższe wymagania odnośnie ciągłości dostaw energii,
- prywatyzacja przemysłu energii elektrycznej,
- stosowanie energooszczędnych rozwiązań,
- wzrost liczby urządzeń wyposażonych w przekształtniki energoelektroniczne, które generują zakłócenia typowe dla swojej klasy,
- wzrost dostępu do informacji o parametrach energii elektrycznej oraz wzrost świadomości odbiorców i dostawców,
- wprowadzenie odnawialnych źródeł energii do systemu elektroenergetycznego.



Rys. 1. Jakość energii jako element monitoringu jakości dostaw energii elektrycznej [31]

Duże zainteresowanie tą dziedziną spowodowało dalszy rozwój w zakresie definicji, legislacji, technicznych środków analizy i oceny czy wreszcie systemów monitorowania. Obecnie rozważając zagadnienie monitoringu jakości dostaw energii elek-

trycznej, można wyróżnić trzy aspekty: handlowy, ciągłości dostaw, jakości energii [14], [31]. Ilustruje to rys. 1 zaczerpnięty z pracy [31].

- Aspekt handlowy mówi o relacji między użytkownikami a dostawcami energii (towaru).
- Aspekt ciągłości dostaw jest skierowany głównie do dostawców i opisuje ilość oraz czas przerw w dostawie energii.
- Aspekt jakości energii jest głównym wyznacznikiem parametrów technicznych np. poziomu napięć, częstotliwość.

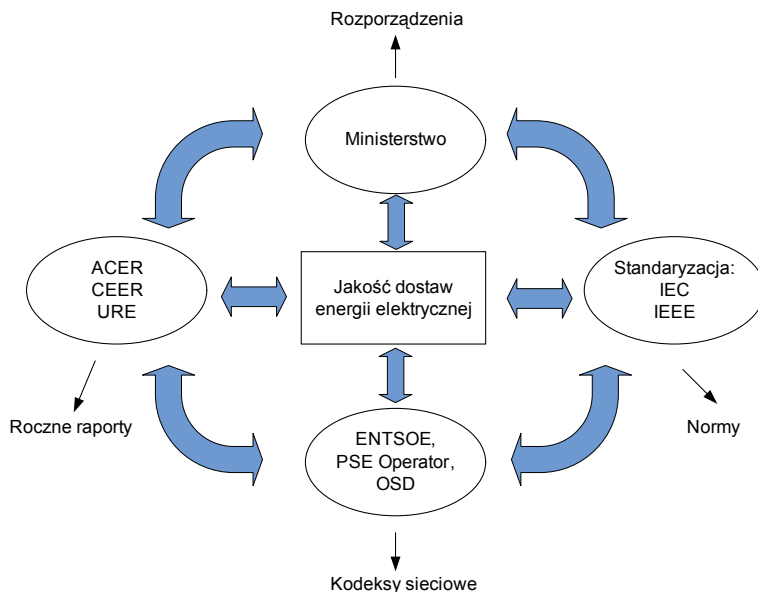
W najnowszym ujęciu jakość energii elektrycznej znajduje swoje odzwierciedlenie w szerszej problematyce związanej z bezpieczeństwem energetycznym kraju. Stawiane problemy dotyczą jakości zasilania strategicznych odbiorców, strat związanych z niewystarczającymi parametrami jakościowymi energii, wpływem źródeł rozproszonych na stabilność pracy systemu. Dodatkowym aspektem są zagadnienia związane z funkcjonowaniem rynku energii a parametrami jakościowymi energii elektrycznej. Dyskutowany jest element uwzględnienia poziomów parametrów jakościowych w systemie taryf, bonifikat bądź umów indywidualnych [14], [34].

Parametry pracy systemu elektroenergetycznego podlegają ciągłej zmianie, niektóre zjawiska, które zachodzą w systemach są krótkotrwałe i pojawiają się w sposób losowy. Aby je zaobserwować i przeanalizować potrzebne jest stosowanie odpowiednich przyrządów pomiarowo – rejestrujących (analizatorów, rejestratorów), których zadaniem jest kontrola i ocena zespołu parametrów jakościowych energii elektrycznej. Do grupy ocenianych parametrów zaliczamy obecnie [2], [3], [13], [14], [26], [30]:

- 1) częstotliwość zasilania, zmiany częstotliwości,
- 2) zmiany amplitudy napięcia, powolne zmiany napięcia, poziom napięcia
- 3) wahania napięcia, wskaźnik migotania światła
- 4) nagłe zmiany napięcia
- 5) niesymetria (asymetria)
- 6) harmoniczne, interharmoniczne, subharmoniczne, składowa stała
- 7) zdarzenia napięciowe:
 - 7a) zapady,
 - 7b) krótkie przerwy,
 - 7c) długie przerwy,
 - 7d) wzrost,
 - 7e) szybkie stany przejściowe, oscylacyjne, impulsowe,
 - 7f) załamanie komutacyjne,
- 8) sygnały sterująco-kontrolne.

Przy omawianiu zagadnień związanych z oceną jakości energii elektrycznej należy nawiązać do dokumentów prawnych regulujących powyższe zagadnienie. Rysunek 2 ilustruje powiązania pomiędzy instytucjami związanymi z procesem legislacji dokumentów mających bezpośredni wpływ na rozwój aktywności dotyczących ocen jakości elektrycznej. Warto zauważyć, że w proces ten zaangażowane są wszystkie

podmioty, zarówno tworzące odpowiednie legislacje (prawo energetyczne, rozporządzenia), rekomendujące standardy (towarzystwa standaryzacyjne), operatorzy przesyłowi i dystrybucyjni, jak również urzędy regulacji.



Rys. 2. Wpływ instytucji (gremiów) na jakość energii elektrycznej

Jako przykład podstawowych dokumentów regulującymi zagadnienie związane z jakością energii elektrycznej w kraju podano:

- ustawa – prawo energetyczne [35],
- rozporządzenia ministra[28],
- normy w zakresie kompatybilności elektroenergetycznej [26],
- kodeksy sieciowe, instrukcje ruchu i eksploatacji sieci przesyłowej i dystrybucyjnej.

Jako element dyscyplinujący można uznać raporty benchmarkingowe wydawane przez urzędy regulacji międzynarodowe CEER/ACER [8] jak i krajowe URE [36].

2. WSPÓŁCZESNE KIERUNKI W OCENIE JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Do celów oceny jakości energii elektrycznej stosuje się obecnie wieloparametrowe rejestratory jakości energii elektrycznej, których zadaniem jest pomiar i analiza parametrów jakościowych energii elektrycznej. Obecnie na rynku dostępne jest wiele

przyrządów pomiarowych, urządzeń cyfrowych wyposażonych w coraz to nowsze procesory i większą pojemność pamięci. W pracy [25] zebrano przegląd oferty dostępnych na rynku rejestratorów jakości energii elektrycznej.

Zauważa się rosnące oczekiwania pod względem funkcjonalności rejestratorów. O wyborze odpowiedniego rejestratora nie decyduje już wyłącznie klasa dokładności mierzonych parametrów jakościowych, ale również dodatkowe możliwości odpowiedniej selekcji danych zawierających ważne informacje o zaburzeniach. Przykładem mogą być aplikacje metod dających możliwość określenia kierunku danego zaburzenia, co wykracza poza klasyczną ocenę parametrów jakościowych.

Coraz powszechniej wprowadza się stacjonarne systemy monitoringu jakości energii elektrycznej, uzupełniając tym samym doraźne pomiary z użyciem rejestratorów mobilnych. Podstawową zaletą systemów monitoringu jest archiwizacja danych uzyskanych z wielu punktów pomiarowych w zunifikowanej bazie danych. Tak zagregowane dane dają dalsze możliwości rozszerzenia analizy. Podstawowe założenia dotyczące struktury oraz funkcjonalności systemów monitoringu jakości energii elektrycznej zamieszczono między innymi w pracach [10]–[12], [31].

Przy wyborze rejestratora dedykowanego do pracy w systemie monitoringu należy zwrócić uwagę na możliwość danego urządzenia:

- wstępna obróbka pomiarów według parametrów zadanych przez użytkownika,
- komunikacji z bazą danych,
- standaryzację przesyłanych danych.

W rejestratorach do komunikacji z bazą danych stosuje się różne media do transmisji danych, w związku z tym w urządzeniu należy zainstalować np.:

- serwery portów równoległych,
- modem GSM,
- sieć bezprzewodowa Wi-Fi,
- modemy analogowe itp.

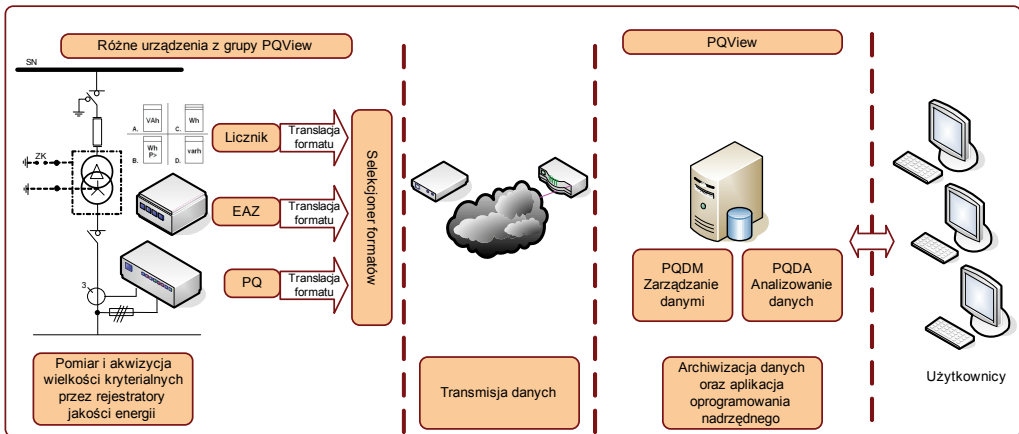
Biorąc pod uwagę transmisję danych na odległość najlepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie protokołów TCP/IP, w których komunikacja odbywa się poprzez modemy GSM lub wewnętrzną sieć internetową stacji elektroenergetycznych.

Na podstawie informacji znajdujących się w bazie danych program nadrzędny powinien stwarzać możliwości:

- tworzenie wykresów, np. diagramów dobowych, tygodniowych, miesięcznych a nawet rocznych,
- statystyczną analizę wyników z różnych punktów pomiarowych,
- przygotowanie raportów,
- tworzenie wskaźników do analizy zapadów i wzrostów napięcia itp.

Pomimo zdefiniowanych zadań dla systemu monitoringu jakości energii elektrycznej problemem wciąż pozostaje integracja rejestratorów różnych producentów w jednolity system. W tym celu został zaproponowany ujednolicony format danych jako-

ści energii elektrycznej PQDIF (ang. *Power Quality Data Interchange Format*) [20]. Do pobierania, analizy i archiwizacji danych w tym formacie opracowany dedykowany system PQView. Powyższe oprogramowanie może również integrować urządzenia rejestrujące różne parametry techniczne, jeśli urządzenia te zostaną doposażone w moduł translacji formatu danych. Ideę integracji urządzeń w ujednoliconym formacie danych przedstawia (rys. 3), zaczerpnięty z pracy [31]. Stosowanie ujednoliconego formatu danych zapewniłoby szersze możliwości oceny jakości energii elektrycznej w różnych obszarach systemu elektroenergetycznego.

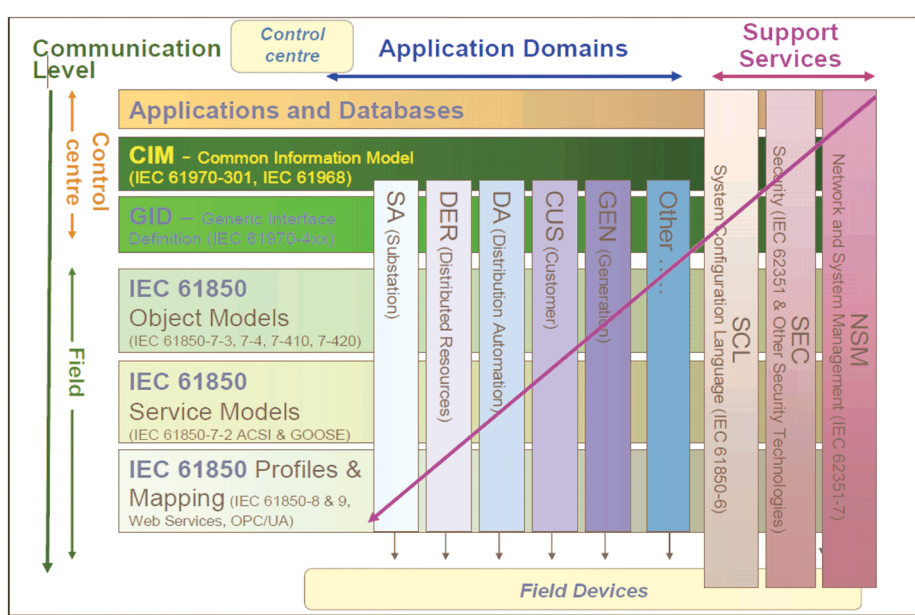


Rys. 3. Integracja różnych urządzeń w jeden system zarządzany środowiskiem PQView [31]

W obecnym czasie bardzo wyraźnym kierunkiem rozwoju sieci elektroenergetycznych jest koncepcja inteligentnych sieci elektroenergetycznych tzw. „smart grids”. Podstawowym założeniem jest możliwość integracji i interoperacyjności elementów systemu elektroenergetycznego. Jako przykład rozszerzenia możliwości monitoringu parametrów jakości energii w idei „smart grid” jest wykorzystanie funkcji elektronicznych liczników energii elektrycznej pozwalających na zdalną transmisję danych jak również implementację różnych algorytmów oceny parametrów jakości energii elektrycznej. Innym przykładem jest wykorzystanie infrastruktury sterowania i nadzoru. Jako przykład dyskusji można podać prace [1], [6], [14], [32], [37].

Jednak główny nurt aktywności związany ze standaryzacją pracy sieci elektroenergetycznych w kierunku ich informatyzacji skupia się wokół komitetów standaryzacyjnych takich jak IEC czy IEEE. Przykładem mogą tu być opracowane zagadnienia integracji zawarte w projekcie standardu IEEE 2030 [21] dedykowanego inteligentnym sieciom elektroenergetycznym. Głównym celem prac nad tymi standardami jest wprowadzenie ujednoliconych protokołów komunikacyjnych dla pod-

miotów będących elementami inteligentnej sieci elektroenergetycznej, zwiększających możliwości ich wzajemnej interoperacyjności. Inne prace tego Komitetu zaowocowały serią standardów oraz referencji związanych bezpośrednio z problematyką współpracy generacji rozproszonej z siecią. Standardy z serii IEEE 1547 dotyczą między innymi testów jednostek wytwórczych, wpływu źródeł na lokalną oraz obszarową pracę sieci, monitoringu oraz standaryzacji formatu wymiany danych czy organizacji pracy wyspowej. Równoległe prace prowadzi komitet IEC wprowadzając unormowany protokół komunikacyjny dla elementów teleinformatyki stacyjnej IEC 61850. Na szczególną uwagę zasługują starania opracowywane w standardzie IEC 61970 służące wprowadzeniu wspólnego systemu CIM (ang. *Common Information Model*) i jego aplikacji na poziomach dystrybucyjnych, w tym układach generacji rozproszonej. Zestawienie wybranych norm podejmujących omawianą tematykę zebrano w tabeli 1. Jako przykład ilustrujący proces integracji standardów komunikacyjnych na rys. 4 przedstawiono koncepcję standardów z grupy IEC [18].



Rys. 4. Koncepcja integracji standardów wg IEC [18]

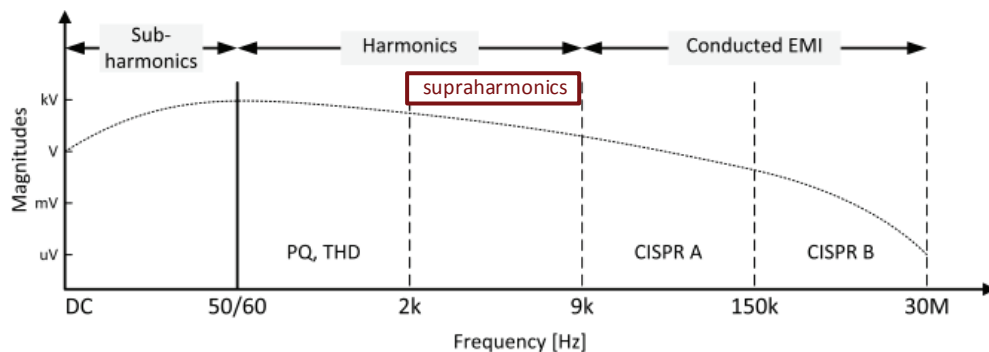
Innym problemem jest rozszerzenie zakresu częstotliwości zaburzeń traktowanych jako zaburzenia jakości energii elektrycznej. Obecnie szeroko dyskutowanym dokumentem jest projekt standardu IEC 61000-4-16 [19] postulujący włączenie do zakresu oceny jakości energii tzw. zaburzeń przewodzonych, (ang. *conducted disturbances*)

w zakresie częstotliwości od 0 do 150 kHz stosowanych przy zasilaniu, sterowania sygnałów i linii komunikacyjnych. W dyskusji wyróżnia się następujące pasma częstotliwości, przedstawione na rys. 5:

- 50 Hz÷2.0/2,5 kHz (np. harmoniczne sieciowe, zakres oceny jakości energii),
- 2,5÷9,0 kHz (ang. *supraharmonics*, zakres niesprecyzowany przepisami [4], [5]),
- 9 kHz÷150 kHz (np. harmoniczne częstotliwości przełączania układów komutacyjnych [23]).

Tabela 1. Zestawienie wybranych norm dedykowanych obszarom monitoringu jakości energii oraz komunikacji elementów systemu elektroenergetycznego wg towarzystw normalizacyjnych IEC oraz IEEE, [32]

	<p style="text-align: center;"><i>TC 77 Electromagnetic compatibility</i> TC 57 Power systems management and associated information exchange</p>
<p>IEC 61000: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) w tym przede wszystkim: PN-EN 61000-4-30: Metody pomiaru jakości energii PN-EN 61000-4-13: Harmoniczne i interharmoniczne wraz z sygnałami sieciowymi w przyłączy zasilającym prądu przemiennego PN-EN 61000-4-15:2011: Miernik migotania światła – Specyfikacja funkcjonalna i projektowa IEC 61000-3-6 (7) (13): Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems IEC CEI 61000-4-16: Testing and measurement techniques – Test for immunity to conducted, common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz. PN-EN 50160: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych PN-EN 61850: Systemy i sieci komunikacyjne w stacjach elektroenergetycznych (410 – Elektrownie wodne, 420 – Systemy komunikacyjne dla rozproszonych źródeł energii) PN-EN 60870: Urządzenia i systemy telesterowania (Elektroenergetyczne Systemach Sterowania i Nadzoru)</p>	
	<p style="text-align: center;"><i>IEEE SCC22 Standards Coordinating Committee on Power Quality</i> IEEE SCC21 Standards Coordinating Committee on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage</p>
<p>IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems IEEE Std 1159-2009: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality IEEE Std 1159.3-2003: IEEE Recommended Practice for the Transfer of Power Quality Data (PQDIF) IEEE Std 1250-2011: IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances IEEE Std 1453-2011: IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment</p>	
<p>Standard P1547 Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems Standard P2030 Smart Grid Interoperability Series of Standards</p>	



Rys. 5. Koncepcja rozszerzenie zakresu częstotliwości obejmującego zaburzenia jakości energii elektrycznej wg IEC [19]

3. WYBRANE PROPOZYCJE NOWYCH WSKAŹNIKÓW JAKOŚCI ENERGII

Techniki pomiarowe i obliczeniowe stosowane obecnie w klasycznej ocenie jakości energii elektrycznej opisane są w przywołanych normach umieszczonych w tabeli 1. Jednakże we współczesnej literaturze poświęconej zagadnieniom detekcji, kwalifikacji i ocenie zaburzeń jakości energii elektrycznej nie brakuje propozycje zastosowania nowych metod analizy sygnałów w celu lepszej identyfikacji zaburzeń. Wraz z propozycjami metod obliczeniowych wprowadzane są propozycje nowych wskaźników jakościowych. Wśród przykładowych nowych technik obliczeniowych wskazać można [2], [3], [7], [9], [16], [17], [29], [33]:

- RLS (ang. *recursive least squares*),
- LMS (ang. *least mean squares*),
- szybka transformata Fouriera (FFT – ang. *fast Fourier transform*),
- filtr Kalmana,
- zmodyfikowana rekursywna metoda Newtona Gausa (MRGN – ang. *modified recursive Gauss Newton*),
- transformacje czasowo-częstotliwościowe, w tym krótkoczasowa transformata Fouriera (STFT – ang. *short-time Fourier transform*), transformacja falkowa (CWT – ang. *continous wavelet transform*), transformata S (ang. *S-transform*),
- metody dekompozycji sygnału,
- transformacja Hilberta,
- parametryczne metody estymacji widma,
- narzędzia statystycznej analizy danych długoterminowych,
- narzędzia korelacyjne.

Owoce badań nad możliwościami zastosowania nowych technik obliczeniowych są propozycje nowych wskaźników jakościowych. Analiza literaturowa pozwala na identyfikację następujących grup nowo proponowanych parametrów jakości energii [2], [3], [7], [15]:

- związanych z identyfikacją, klasyfikacją i oceną zaburzeń dynamicznych tzw. zdarzeń,
- oceniających kierunek źródła zaburzenia, a więc związanych z odpowiedzialnością pomiędzy odbiorcą/wytwórcą a operatorem systemu,
- wprowadzających ekonomiczne aspekty parametryzacji jakości energii,
- wprowadzających wskaźniki globalne, obszarowe, w tym wskaźniki niezawodności dostaw energii.

Przykłady wybranych nowych wskaźników jakości energii elektrycznej zebrano poniżej.

1. Chwilowy współczynnik zawartości harmonicznych (ITHD – ang. *Instantaneous total harmonic distortion*, STHD – ang. *short term harmonic distortion*), który może być traktowany jako detektor zdarzenia na podstawie przekroczeń udziału harmonicznych wyznaczanych w przesuwym oknie pomiarowym [22].

$$\text{ITHD} = \sqrt{\frac{I_{L1}^2 - I_{L11}^2}{I_{L11}^2}} \quad (1)$$

gdzie I_{L1} – skuteczna wartość prądu w fazie $L1$, I_{L11} skuteczna wartość prądu dla składowej podstawowej.

$$\text{STHD} = \frac{\sqrt{\sum_{i \neq 1, (f_0 / \Delta f) + 1} \text{WDFT}_i^2}}{\text{WDFT}_{\frac{f_0}{\Delta f} + 1}} \quad (2)$$

gdzie WDFT – dyskretna transformata Fouriera w oknie czasowych.

2. Chwilowy wskaźnik zawartości energii harmonicznych w sygnale (DIN – ang. *normalized instantaneous distortion energy ratio*) [27].

$$\text{DIN}_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k=\infty} |V_k|^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{k=\infty} |V_k|^2}} \quad (3)$$

gdzie k – numer harmonicznych, V – sygnał napięcia.

3. Chwilowa amplituda (IA – ang. *instantaneous amplitude*) oraz chwilowa faza sygnału (IF – ang. *instantaneous phase*).

$$\text{IF}(t) = \frac{\int \omega \cdot \text{TFD}_S(t, \omega; \phi) d\omega}{\int \text{TFD}_S(t, \omega; \phi) d\omega}, \quad (4)$$

gdzie TFD – rozkład czasowo-częstotliwościowy, S – całkowity sygnał, na który składa się składowa podstawowa wraz ze wszystkimi zakłóceniami.

4. Współczynnik odchyłki częstotliwości (FDR – ang. *Power Frequency Deviation Ratio*), współczynnik odchyłki od symetrii (SDR – ang. *Symterical Components Deviation Ratio*) [24].

$$\text{FDR} = \frac{|f_m - f_1|}{f_1} \times 100\%, \quad (5)$$

gdzie f_1 – częstotliwość znamionowa, f_m – zmierzona częstotliwość dla składowej podstawowej.

$$\text{SDR} = \frac{\sqrt{|V_{mp} - V_1|^2 + V_{mn}^2 + V_{mz}^2}}{V_1} \times 100\%, \quad (6)$$

gdzie V_1 – amplituda składowej podstawowej, V_{mp} , V_{mn} i V_{mz} – zmierzona amplituda dla składowej podstawowej: zgodnej, przeciwnej i zerowej

5. Chwilowy współczynnik kształtu (IFF – ang. *Instantaneous Form Factor*) wyznaczany w dziedzinie czasu określany jako stosunek amplitudy wszystkich zakłóceń zawartych w sygnale do wartości średniej składowej podstawowej zawartej w sygnale (50 Hz). Za pomocą transformaty S wyznaczone są amplitudy dla wszystkich częstotliwości oraz S – amplituda dla składowej podstawowej [9].

$$\text{IFF}(\tau) = \frac{\sqrt{\sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} (S_D(\tau, f))^2}}{\frac{1}{N} \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_P(\tau, f)} \dots \dots \forall \tau : 0 \text{ do } N \quad (7)$$

6. Wskaźnik chwilowego wahania częstotliwości (IFI – ang. *Instantaneous Frequency variation Index*) określany jest jako stosunek częstotliwości wyznaczanych za pomocą transformaty S sygnału zakłóconego do częstotliwości składowej podstawowej wyznaczanej również za pomocą transformaty S [9].

$$\text{IFI}(\tau) = \frac{f_1 * AM_s(\tau)}{AM_p(\tau)} \quad (8)$$

7. Współczynnik obciążenia (LCI – ang. *Load characterization index*) wskazujący udział prądu liniowego i nieliniowy w charakterze odbiornika. Współczynnik ten bazuje na rozkładzie prądu obciążenia na dwie składowe. Pierwsza wprowadza harmoniczne zniekształcenia do systemu natomiast druga składowa prądu posiada takie same harmoniczne zniekształcenia, które występują w napięciu [16], [17].

$$\text{LCI} = \begin{cases} 0 & \text{dla liniowego obciążenia} \\ \frac{\|I_{nl}\|}{\|I\|} \cdot 100 & \text{dla źródła zakłócenia} \end{cases}, \quad (9)$$

gdzie I_{nl} – nieliniowy prąd wprowadzający zniekształcenia od harmonicznym w systemie elektroenergetycznym, I – całkowity prąd systemu.

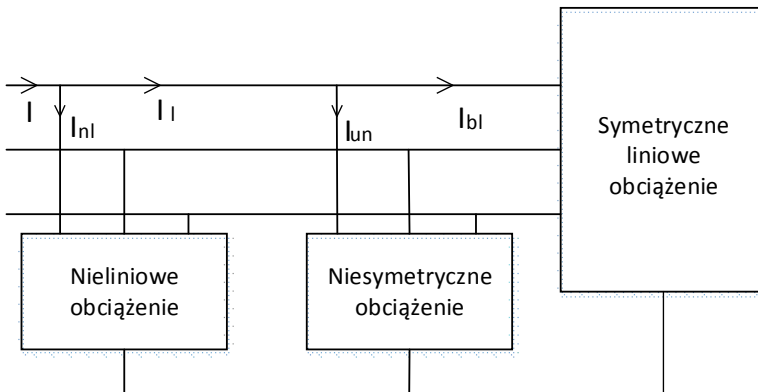
$$\|I\| = \sqrt{\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^N I_{jk}^2}, \quad (10)$$

gdzie I_{jk} – harmoniczna k fazy j całkowitego prądu, N – najwyższa harmoniczna.

8. Współczynnik asymetrii prądu (UCR – ang. *Unbalance current ratio*). Bazuje na rozłożeniu prądu obciążenia na trzy składowe. Pierwsza składowa związana jest z niesymetrią liniowego obciążenia druga z nieliniowym obciążeniem a trzecia składowa związana jest z symetrycznym liniowym obciążeniem [16], [17].

$$\text{UCR} = \frac{\|I_{un}\|}{\|I\|} \cdot 100, \quad (11)$$

gdzie I_{un} – prąd, który związany jest z wprowadzaniem asymetrii do systemu



Rys. 6. Rozkład prądów obciążeń [16], [17]

W przypadku charakterystyk obciążenia wyróżniamy:

- obciążenie nieliniowe,
- obciążenie niesymetryczne,
- obciążenie symetryczne i liniowe.

Rysunek 6 zaczerpnięty z pracy [17] ilustruje rozkład prądu wejściowego na trzy składniki wymagane przez poszczególne obciążenia, są to I_{nl} – prąd, który wprowadza zniekształcenia i jest wymagany przez nieliniowe obciążenie, I_{un} – prąd, który wprowadza asymetrię do sytemu, wymagany przez niesymetryczne obciążenie oraz na prąd I_{bl} , który jest symetryczny i liniowy.

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące wybranych współczesnych kierunków rozwoju oceny jakości energii elektrycznej. Omówiono podstawowe pojęcia standardy, narzędzia oraz zagadnienia monitorowania jakości energii elektrycznej. Z przeprowadzonego przeglądu oraz przywołanych aktywności w środowiskach powiązanych z rozwojem jakości energii elektrycznej obserwuje się przeniesienie realizacji oceny jakości energii z pomiarów mobilnych, wykonywanych nierzadko doraźnie na zgłoszenie odbiorcy, w kierunku stosowania obszarowego monitoringu jakości energii elektrycznej. W działalności operatorów zauważa się planowe rozszerzanie instalowanych systemów monitoringu. Objęcie monitorowaniem i ciągłą analizą wydzielonych fragmentów sieci elektroenergetycznych stwarza nowe możliwości dla diagnostyki pracy sieci, lokalizacji źródeł zaburzeń, a także predykcji stanu pracy sieci. Tak postawiony horyzont stawia przed funkcjonalnością systemów monitoringu jakości energii elektrycznej nowe wyzwania, które będą wymagać wsparcia poprzez zastosowanie matematycznych narzędzi oceny statystycznej, algorytmów przetwarzania sygnałów. Jako element aktualizacji stanu rzeczy należy postulować cykliczne wykonywanie krajowych raportów benchmarkingowych jako kontynuację I-go krajowego raportu benchmarkingowego nt. jakości dostaw energii elektrycznej do odbiorców przyłączonych do sieci przesyłowej i dystrybucyjnej z roku 2009.

Praca podnosi również znaczenie rozszerzenia zakresu częstotliwości oceny parametrów jakościowych energii elektrycznej ze stosowanego obecnie 0–2 kHz do 0–150 kHz. Pierwszym podzakresem, który ma szczególne znaczenie w układach energoelektronicznych jest zakres 2–9 kHz (tzw. suprahamonics).

Przywołane propozycje wybranych wskaźników jakościowych powstałych poprzez wykorzystanie zaawansowanych technik analizy sygnału mogą wnieść nową jakość w ocenę zaburzeń jakości energii, zwłaszcza z punktu widzenia ich zastosowania w detekcji, klasyfikacji zaburzeń, jak również w określeniu kierunkowości zaburzenia.

LITERATURA

- [1] BANSIDHAR E.K., ASHOK A.G., SUMIT K. *Development of web based power quality monitoring system for handling user custom power quality query and auto power quality monitoring report notification via email*, ICTES, 2007
- [2] BOLLEN M.H.J., *Understanding Power Quality Problems. Voltage sags and interruptions*, IEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- [3] BOLLEN M.H.J., GU Y.H.I., *Signal processing of power quality disturbances*, John Wiley & Sons, 2006.
- [4] BOLLEN M.H.J., Ribeiro P.F., Larsson E.O.A., Lundmark C.M., *Limits for Voltage Distortion in the Frequency Range 2 to 9 kHz*, IEEE Trans. on Power Delivery, 2008, Vol. 23, No. 3, 1481–1487.
- [5] BOLLEN M.H.J., OLOFSSON M., LARSSON A., RÖNNBERG S., LUNDMARK M., *Standards for Supraharmonics (2 to 150 kHz)*, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2014, Vol. 3, No. 1, 114–119.
- [6] BOLLEN M.H.J., BAHRAMIRAD S., KHODAEI A., *Is there a Place for Power Quality in the Smart Grid?*, IEEE, 2014
- [7] CARAMIA P., CARPINELLI G., VERDE P., *Power Quality Indices in Liberalized Markets*, John Wiley & Sons, 2009.
- [8] CEER – *Council of European Energy Regulator, 5th Benchmarking report on quality of electricity supply*, 2011.
- [9] CHIRAG A.N., PRASANTA K., *New Power Quality Indices Based on S-transform for Non-stationary Signals*, International Conference on Power and Energy, 2012
- [10] FILRIT A., *Ciągły monitoring i analiza jakości energii elektrycznej*, Elektroenergetyka, 2011, nr 4, 10.
- [11] GŁOWACKI F., KOSEDA H., *Systemy monitoringu jakości energii elektrycznej*, Biuletyn Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Energia Elektryczna, <http://www.e-elektryczna.pl/?d=2&s=art0909#>, dostęp: 30.10.2014.
- [12] GUBAŃSKI A., JANIK P., KOSTYŁA P., REZMER J., SIKORSKI T., SZYMAŃDA J., WACŁAWEK Z., *Analiza porównawcza funkcjonalności rozproszonych systemów monitoringu jakości energii*, Energetyka, 2012.
- [13] HANZELKA Z., *Jakość energii elektrycznej: wczoraj, dziś i jutro*, Materiały, Twelve Electric.
- [14] HANZELKA Z., *Jakość energii w warunkach rynku energii*, Biuletyn URE, 5/2003.
- [15] HANZELKA Z., *Jakość dostaw energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia*, Wydawnictwo AGH, Kraków 2013.
- [16] HERRERA R.S, SALMERÓN P., *Harmonic disturbance identification in electrical systems with capacitor banks*, Electric Power Systems Research, 2011.
- [17] HERRERA R.S., VÁZQUEZ J. R., *Identification of unbalanced loads in electric power systems*, International Transactions on Electrical Energy Systems, 2013.
- [18] IEC Smart Grid Standardization Road Map SMB Smart Grid Strategic Group (SG3), Edition 1.0, June 2010.
- [19] IEC CEI 61000-4-16, *Testing and measurement techniques – Test for immunity to conducted, common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz*.
- [20] IEEE Std. 1159 – *Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Working Group on Monitoring Electric Power Quality reports to the Power Quality Subcommittee of the IEEE Power Engineering Society, 2003–2009.
- [21] IEEE Std. 2030 – *Smart Grid Interoperability Series of Standards*, IEEE SCC21 Standards Coordinating Committee on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage, 2011.
- [22] JARAMILO S.H., HEYDT G.T., *Power Quality Indices for Aperiodic Voltages and Currents*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, Vol. 15, No. 4.

- [23] 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, 2010, Vol. 25, No. 3, 1749–1757.
- [24] LIN T., DOMIJAN A., *On Power Quality and Real Time Measurement*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, Vol. 20, No. 4, 2552–2562.
- [25] MAGDZIAK R., *Analizatory jakości energii elektrycznej – polscy producenci i dystrybutorzy*, Portal internetowy: <http://elektronikab2b.pl/raporty/1979-analizatory-jakosci-energii-elektrycznej-polscy-producenci-i-dystrybutorzy?limitstart=0#.VFu0vmG8io>, dostęp: 31.10.2014.
- [26] PN-EN 50160 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*, 2010.
- [27] POWERS E.J., SHIN Y.J., GRADLY M., ARAPOSTATHIS A., *Power Quality Indices for Transient Disturbances*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, Vol. 21, No. 1.
- [28] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie *szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego*, ze zmianami 21 sierpnia 2008 r. (Dz.U. 2008 Nr 162, poz. 1005).
- [29] SALMERÓN P., HERRERA R.S., VALLÉS A. P., PRIETO J., *New Distortion and Unbalance Indices Based on Power Quality Analyzer Measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2009.
- [30] SANKARAN C., *Power Quality*, CRC Press, 2002.
- [31] SIKORSKI T., *Monitoring i ocena jakości energii w sieciach elektroenergetycznych z udziałem generacji rozproszonej*, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2013.
- [32] SIKORSKI T., SZYMAŃDA J., ZENGER M., *Monitoring i analiza stanów zakłóceń w sieciach elektroenergetycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, Vol. 88, nr 11b, 178–181.
- [33] SONTAKKE S., THORAT A., *Novel Method for Estimation of PQ Indices in Microgrids*, International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013.
- [34] *Strategia Bezpieczeństwo Energetyczne i Środowisko – perspektywa do 2020 r.*, Ministerstwo Gospodarki, Ministerstwo Środowiska, Warszawa, kwiecień 2014.
- [35] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – *Prawo energetyczne* (Dz.U. z 1997, nr 54, poz. 348) z późniejszymi zmianami, jednolity tekst ustawy w Dz.U. 2006, nr 89, poz. 625, oraz ostatnie zmiany w Dz.U. z 2007 r., Nr 21, poz. 124; Dz.U. z 2007 r., Nr 52, poz. 343; Dz.U. z 2007 r., Nr 115, poz. 790; Dz.U. z 2007 r., Nr 130, poz. 905.
- [36] URE – Urząd Regulacji Energetyki, *I Krajowy raport benchmarkingowy nt. jakości dostaw energii elektrycznej do odbiorców przyłączonych do sieci przesyłowej i dystrybucyjnej*, 2009.
- [37] ZAVODA F., *Advanced Distribution Automation (ADA) Applications and Power Quality in Smart Grids*, ICED 2010.

SELECTED ISSUES OF PRESENT POWER QUALITY ASSESSMENT

This paper describes the development of power quality. Discussed issues stay in relation to aspects of present power systems, taking into consideration technical aspects, energy market and energy security. It was suggested the need to develop of power quality monitoring systems and continue benchmarking reports. Additionally a new challenges was highlighted including extension of the frequency range of power quality disturbances, use of new signal analysis tools for the analysis of long-term and multi-point data, locating sources of disturbance. Next aspect pointed out the need to integrate power quality monitoring in the process of the interoperability of power systems. Additionally, selected issue of new power quality indices is presented.