

## JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W PUNKCIE IDENTYFIKACJI W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

Sławomir CIEŚLIK

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Telekomunikacji Informatyki i Elektrotechniki  
tel.: 52 340-85-60 e-mail: slawcies@utp.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono uzasadnienie i propozycję definicji jakości energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym. Punktem wyjścia było założenie, że energia elektryczna jest towarem w systemie elektroenergetycznym. Podano również definicje pojęć ściśle związanych z jakością energii elektrycznej w tych systemach.

**Słowa kluczowe:** jakość energii elektrycznej, miary jakości energii, poziomy jakości energii.

### 1. WPROWADZENIE

Terminu „jakość energii elektrycznej” używa się bardzo często, ale w zdecydowanej większości przypadków z dużą niepewnością co do jego znaczenia. W słowniku języka polskiego (PWN, Warszawa, 1996) napisano, że jakość jest to „właściwość, rodzaj, gatunek, wartość; zespół cech stanowiących o tym, że dany przedmiot jest tym przedmiotem, a nie innym”. Od tego objaśnienia zaczyna również autor książki [1], ale zaznacza, że energia jako kategoria fizyczna jest bytem obiektywnie istniejącym, niepodlegającym wartościowaniu. Dopiero próba traktowania energii elektrycznej jako towar znajduje uzasadnienie w kontekście jakości. Nie jest do tego przekonany autor artykułu [2], który uważa, że jakość nie może być atrybutem energii. Uzasadnieniem jest to, że np. odkształcenie przebiegu napięcia, traktowane jako obniżenie jakości energii elektrycznej, nie dostarcza żadnych informacji o źródłach tego odkształcenia, kto za nie odpowiada i nie informuje o środkach jego zmniejszenia.

Zakupiona suszarka do włosów, posiadająca trzy stopnie podgrzewania powietrza, która podłączona do sieci elektroenergetycznej, na stopniu trzecim nie zwiększa temperatury wylatującego powietrza w stosunku do stopnia drugiego jest urządzeniem sprawnym w ogóle, ale o jakości niższej niż suszarka z działającymi właściwie trzema stopniami. Jednak jest ona o jakości wyższej niż suszarka działająca tylko na jednym stopniu. To są stwierdzenia obiektywne różnych poziomów jakości suszarki do włosów. Zauważmy, że te stwierdzenia nie odpowiadają na być może bardzo interesujące pytania: co jest przyczyną braku pełnej funkcjonalności, kto jest temu winny i jakim sposobem przywrócić tę funkcjonalność. Czy to znaczy, że określenie poziomów jakości suszarki nie ma sensu? Sens można znaleźć choćby w tym, że określenie poziomów jakości

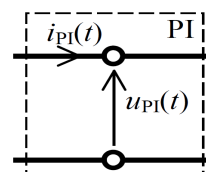
suszarki może być podstawą, np. obiektywnego ustalenia jej ceny.

Można zastanawiać się, komu jest potrzebne wyjaśnianie, definiowanie i uzasadnianie terminu „jakość energii elektrycznej”, skoro budzi to tak wiele kontrowersji. Przyczyna jest prosta. Energia elektryczna jest towarem podlegającym handlowi (energia elektryczna jest kupowana i sprzedawana, zatem podlega obrotowi towarowemu). Towar staje się przedmiotem społecznego zapotrzebowania dzięki temu, że posiada wartość użytkową – określoną jakością.

### 2. JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

System elektroenergetyczny jest to zbiór połączonych ze sobą elementów do wytwarzania, przetwarzania, przesyłania i rozdzielania energii elektrycznej wraz z jej odbiorcami, stanowiących na określonym obszarze działania pewną całość, uwarunkowaną logicznym uporządkowaniem ich struktury i działania. Energia elektryczna może być rozumiana jako towar, który jest:

- wytwarzany – energia elektryczna pozyskiwana w wyniku konwersji energii z innej postaci (np.: chemicznej, cieplnej, mechanicznej, świetlnej), wliczając w to również energię z magazynów;
- transportowany – energia elektryczna przesyłana i rozdzielana w sieciach elektroenergetycznych;
- zużywany – energia elektryczna w wyniku konwersji jest przekształcana na inne postaci energii użytecznej, w odbiorniku energii elektrycznej, grupie odbiorników lub gromadzona w magazynach.



Rys. 1. Punkt identyfikacji (jedna faza) w systemie elektroenergetycznym

Wprowadźmy pojęcie punktu identyfikacji (PI) w systemie elektroenergetycznym, w którym będzie

identyfikowana jako jakość energii elektrycznej. Punkt identyfikacji (rys. 1) jest to komplementarna para zbiorów: gałęzi obwodu elektrycznego (jednej w przypadku układu jednofazowego, trzech w przypadku układu trójfazowego) i węzłów elektrycznych (dwóch w przypadku układu jednofazowego, trzech lub czterech w przypadku układu trójfazowego).

Ujęcie ilościowe energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w dowolnym miejscu systemu elektroenergetycznego (dla jednej fazy), w określonym czasie  $\Delta t = t_2 - t_1$ , opisuje następująca zależność

$$w_{PI} = \int_{t_1}^{t_2} u_{PI}(t) \cdot i_{PI}(t) \cdot dt, \quad (1)$$

gdzie:  $u_{PI}(t)$  – wartość chwilowa napięcia w PI (rys. 1),  $i_{PI}(t)$  – wartość chwilowa natężenia prądu w PI (rys. 1),  $t$  – czas,  $t_1$  – chwila początkowa,  $t_2$  – chwila końcowa.

Przyjmując ogólną definicję jakości [3], jako wszystkie istotne właściwości wytworu bądź usługi, decydujące o ich zdolności do zaspokojenia istniejących i przewidywanych potrzeb, należy zastanowić się jakie właściwości są istotne z określonego punktu widzenia i czy są one kompletne.

Potrzeby w kontekście energii elektrycznej są takie, aby wszystkie przyłączone do danego węzła elementy systemu elektroenergetycznego (głównie: aparaty, urządzenia, maszyny i sieci), działały zgodnie z ich założeniami funkcjonalnymi. Chodzi o szeroko pojęte: przemiany (konwersje) energii elektrycznej na inne postaci energii użytecznej (odbioru) lub innych postaci energii w energię elektryczną (wytworzenie), transformację energii elektrycznej i jej przesyłanie. W tym kontekście warunkiem koniecznym jest, istnienie energii w systemie elektroenergetycznym. W praktyce wyznacznikiem pewnej gotowości systemu do pobierania energii elektrycznej jest obecność w węzle napięcia (napięć) o określonych parametrach. Istotnym warunkiem zaspokojenia potrzeb jest zapewnienie odpowiedniej szybkości pobierania (wprowadzania) energii. W ujęciu fizycznym miarą szybkości zmian energii elektrycznej jest moc, jako iloczyn wartości chwilowych napięcia i natężenia prądu w punkcie identyfikacji.

Kolejnym aspektem dotyczącym potrzeb jest możliwość przyłączenia wymienionych elementów systemu elektroenergetycznego do wspólnego węzła. Tutaj istotne są parametry napięcia, na które dany element został zaprojektowany i zbudowany.

Ogólna postać sinusoidalnego napięcia elektrycznego wyraża się następującą zależnością

$$u(t) = U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \psi_u), \quad (2)$$

gdzie:  $u(t)$  – wartość chwilowa napięcia,  $U_m$  – wartość maksymalna napięcia (amplituda),  $t$  – czas,  $f$  – częstotliwość napięcia,  $\psi_u$  – faza początkowa napięcia.

Istotne właściwości napięcia będą wynikały wprost z parametrów znamionowych elementów systemu, przyłączonych do wspólnej sieci elektroenergetycznej. Z tego wynika, że dla przebiegów sinusoidalnych napięcia, wszystkimi istotnymi właściwościami są:

- wartość skuteczna napięcia (dla przebiegów sinusoidalnych wartość maksymalna podzielona przez  $\sqrt{2}$ ),
- częstotliwość napięcia.

W przypadku układów trójfazowych, do wymienionych wyżej istotnych właściwości należy dodać:

- współczynnik asymetrii.

Zagadnienie komplikuje się w przypadku przebiegu napięcia odkształconego od sinusoidy. Teoretycznie, każdy przebieg, o dowolnym kształcie, można jednoznacznie przedstawić w postaci szeregu Fouriera

$$u(t) = U_0 + \sum_{h=1}^{\infty} U_{mh} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot h \cdot f \cdot t + \psi_{uh}). \quad (3)$$

W praktyce stosuje się aproksymację przebiegu napięcia z zastosowaniem następującej zależności

$$u(t) = U_0 + \sum_{h=1}^k U_{mh} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot h \cdot f \cdot t + \psi_{uh}), \quad (4)$$

gdzie:  $u(t)$  – wartość chwilowa napięcia,  $U_0$  – składowa stała napięcia,  $U_{mh}$  – wartość maksymalna  $h$ -tej harmonicznej napięcia (amplituda),  $t$  – czas,  $f$  – częstotliwość napięcia,  $h$  – rząd harmonicznej,  $\psi_{uh}$  – faza początkowa  $h$ -tej harmonicznej napięcia,  $k$  – rząd najwyższej uwzględnionej harmonicznej napięcia.

Wszystkimi istotnymi właściwościami napięcia  $u(t)$ , o dowolnym kształcie przebiegu, są:

- wartość skuteczna (dla napięcia okresowego

$$\text{o okresie } T: U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) \cdot dt},$$

- częstotliwość,
- kształt przebiegu,

oraz w układach trójfazowych, dodatkowo

- współczynnik asymetrii.

Zgodnie z równaniem (4) kształt przebiegu napięcia może być przedstawiony jednoznacznie przez widmo amplitudowe (lub wartości skutecznych) oraz widmo faz początkowych dla poszczególnych harmonicznych.

Przedstawione wyżej rozważania dają podstawę do sformułowania definicji jakości energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym.

*Definicja 1. Jakość energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym jest to zbiór wszystkich istotnych właściwości napięcia (napięć) oraz szybkości zmian energii w tym punkcie, które decydują o zdolności do zaspokojenia istniejących lub przewidywanych potrzeb energetycznych stron przyłączonych w tym punkcie.*

### 3. OCENA JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

Do oceny jakości, niezbędne jest m. in. wprowadzenie pojęcia miary jakości energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym.

*Definicja 2. Miarą jakości energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym jest zbiór miar liczbowych właściwości określających jakość energii elektrycznej w tym punkcie.*

Miara jakości energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym w określonym czasie może być reprezentowana przez wartości różnych wielkości fizycznych. Miara jakości może być przedstawiona w postaci ogólnej, np. jako następujący zbiór

$$JEE_{PA} = \{ \{n, t_p, t_{sp}, p\} \cup \{U, f, K, a\} \}, \quad (5)$$

gdzie:  $n$  – liczba przerw w dostarczaniu energii,  $t_p$  – zbiór zawierający czasy trwania każdej przerwy,  $t_{sp}$  – łączny czas braku dostaw energii,  $p$  – zbiór miar szybkości zmian energii,  $U$  – zbiór wartości skutecznych napięć,  $f$  – zbiór częstotliwości napięć,  $K$  – parametry opisujące kształt przebiegu napięć,  $a$  – współczynnik asymetrii.

W zakresie miar jakości napięć w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym można opierać się na zapisach normy [4], w której wymienia się następujące parametry napięcia w sieciach niskiego napięcia:

- wartość skuteczna napięcia zasilającego,
- częstotliwość napięcia w sieci zasilającej,
- zmiany napięcia zasilającego,
- szybkie zmiany napięcia (wartość szybkich zmian napięcia oraz uciążliwość migotania światła),
- zapady napięcia zasilającego,
- dorywcze przepięcia o częstotliwości sieciowej między przewodami pod napięciem a ziemią,
- przejściowe przepięcia między przewodami pod napięciem a ziemią,
- niesymetria napięcia zasilającego,
- harmoniczne napięcia (napięcia indywidualnych harmonicznych oraz współczynnik całkowitego odkształcenia  $THD_U$ ),
- interharmoniczne napięcia,
- sygnał napięciowy do transmisji informacji nałożony na napięcie zasilające.

Obecnie wybór miar jakości energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym nie wywołuje większych dyskusji i kontrowersji. Są oczywiście różne propozycje, np. poszerzenia elementów klasycznej oceny jakości energii o informacje (miary) uwzględniające stan pracy sieci, charakterystyki źródeł oraz warunki środowiskowe [5]. Nie zaburza to jednak klasycznego pakietu miar jakości. Dyskusje i kontrowersje wywołują wartości determinujące ocenę jakości energii elektrycznej.

*Definicja 3. Poziom jakości energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym jest określony względną miarą jakości energii, wynikającą z porównania wartości zmierzonych (zaobserwowanych) z wartościami wymaganymi dla jakości energii elektrycznej w danym punkcie identyfikacji.*

Kontrowersje dotyczą kwestii ustalenia wymagań dla jakości energii elektrycznej, szczególnie w sieciach elektroenergetycznych na poziomie wysokiego i najwyższego napięcia. Aspekt wyższych harmonicznych napięć w sieci przesyłowej w kontekście uwarunkowań formalno-prawnych był analizowany w publikacji [6]. Wykazano znaczące rozbieżności w ustalaniu wymagań dla jakości energii elektrycznej formułowanych przez normę [4] i obowiązujące rozporządzenie [7]. Przyczyną tych kontrowersji może być fakt, że rzeczywisty wpływ

wyższych harmonicznych napięć i prądów, szczególnie w sieciach najwyższych napięć nie jest do końca rozpoznany

#### 4. ZARZĄDZANIE JAKOŚCIĄ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

Jeszcze większe problemy ujawniają się, gdy mówimy o zarządzaniu jakością energii elektrycznej. Definicje dotyczące zarządzania jakością energii można przytoczyć bazując na publikacji [3].

*Definicja 4. Zarządzanie jakością energii elektrycznej jest to całość przedsięwzięć organizacyjnych, ekonomicznych i technicznych podejmowanych w celu sformułowania i wdrażania polityki jakości.*

*Definicja 5. Polityka jakości są to zamierzenia i kierunki działań organizacji (operatorów systemów dystrybucyjnych i przesyłowego, odbiorców energii, wytwórców i wszystkich innych podmiotów systemu elektroenergetycznego) dotyczących jakości energii elektrycznej w punktach identyfikacji w systemie elektroenergetycznym.*

Zarządzanie jakością energii elektrycznej w punktach identyfikacji w systemie elektroenergetycznym wymaga opracowania i wdrożenia określonego systemu jakości energii o zasięgu krajowym, regionalnym i lokalnym. System jakości jest rozumiany [3] jako struktura organizacyjna, podział odpowiedzialności, procedury, procesy i zasoby niezbędne do realizacji polityki jakości energii elektrycznej. Niezbędne jest odpowiednie nadzorowanie jakości energii elektrycznej w punktach identyfikacji w systemie elektroenergetycznym, rozumiane jako ciągle kontrolowanie, weryfikowanie i audyt metod, procedur, warunków i procesów mających na celu zapewnienie spełnienia wymagań jakościowych. Zapewnienie odpowiedniej jakości energii elektrycznej w punktach identyfikacji decyduje o relacjach pomiędzy dostawcą i klientem lub w kontekście systemu elektroenergetycznego o relacjach pomiędzy stronami punktu identyfikacji.

Problemem zasadniczym jest to, że jakość energii elektrycznej w punkcie identyfikacji zależy od wzajemnego współdziałania elementów systemu po obu stronach tego punktu. Generuje to problemy sygnalizowane już w niniejszym artykule z przywołaniem publikacji [2] oraz w innych publikacjach, np.: [1, 5, 8], polegające na trudnościach w jednoznacznym i niezawodnym ustaleniu, kto (która ze stron punktu identyfikacji) jest winny pogorszeniu się jakości energii elektrycznej, a bardziej precyzyjnie, kto i w jakim stopniu odpowiada za pogorszenie się jakości energii elektrycznej w danym punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym. Niestety, metod analizy dotyczących choćby zagadnienia wyższych harmonicznych napięć w systemie elektroenergetycznym, zebranych np. w publikacji [8], nie można zaliczyć do jednoznacznie i precyzyjnie wskazujących stopień wpływu strony w punkcie identyfikacji na jakość energii elektrycznej w tym punkcie.

#### 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Używanie pojęcia „jakość energii elektrycznej” budzi wiele kontrowersji. Opierając się tylko i wyłącznie na ścisłych regułach i zasadach fizycznych, rzeczywiście trudno znaleźć sens w tym sformułowaniu. Traktowanie energii

elektrycznej jako towaru, który podlega regułom obrotu towarowego uzasadnia potrzebę poszukiwania definicji jakości tego towaru. Jest ona niezbędna w handlu energią elektryczną. Wprowadzając pojęcie punktu identyfikacji jakości energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym, w niniejszym artykule zaproponowano definicję jakości energii elektrycznej, ale ściśle dotyczącej tylko tego punktu. Pozwala to na wyróżnienie dwóch stron w systemie elektroenergetycznym, które mogą być w określonych relacjach handlowych, ale również wpływają na miary jakości energii. Zatem samo zdefiniowanie jakości energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie nie rozwiązuje szeregu problemów związanych, m.in. z określeniem udziału poszczególnych stron w jakości energii, ani ich odpowiedzialności za pogorszenie tej jakości. Jest jednak punktem zaczepienia w rozumieniu energii elektrycznej jako towaru wraz ze wszystkimi konsekwencjami handlowymi.

Podane definicje dotyczące miary jakości energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym, poziomu jakości oraz zarządzania jakością, przybliżają do analiz szczegółowych, dotyczących zagadnień jakości energii elektrycznej w systemach elektroenergetycznych. Powinno to doprowadzić, m.in., do precyzyjnych, jasnych i niezawodnych sposobów pozwalających na wprowadzenie nagród dla stron (podmiotów) powodujących poprawę jakości energii elektrycznej w punkcie identyfikacji w systemie elektroenergetycznym oraz kar dla stron powodujących jej pogorszenie.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Hanzelka Z.: Jakość dostawy energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia, Wydawnictwa AGH, Kraków 2003.
2. Czarnecki L. S.: Uwagi o terminie „Jakość energii elektrycznej”, *Automatyka-Elektryka-Zakłócenia*, Nr 2, 2013, str. 6-9.
3. Lesiński S.: Jakość i niezawodność, Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996.
4. PN-EN 50160: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, 2010.
5. Sikorski T.: Monitoring i ocena jakości energii w sieciach elektroenergetycznych z udziałem generacji rozproszonej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
6. Cieślak S.: Wyższe harmoniczne napięć w sieci przesyłowej – uwarunkowania formalno-prawne a aspekty techniczne, *Rynek Energii*, Nr 2 (111), 2014, str. 41-46.
7. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. DZ. U. Nr 93, poz. 623, 2007.
8. Wilkosz K.: Metody analizy wyższych harmonicznych w systemach elektroenergetycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.

## QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE IDENTIFICATION POINT IN THE POWER SYSTEM

The paper presents the justification and proposal of a definition for quality of electrical energy in the point of identification in the power system. The starting point is the assumption that electrical energy is a commodity in the power system. A definition of terms closely related to the quality of electrical energy in these systems is also presented.

**Keywords:** quality of electric energy, power quality, electric power system.