

Wybrane aspekty oceny jakości energii elektrycznej w sieciach średniego napięcia współpracujących z elektrownią wiatrową

Abstrakt. *W artykule zaprezentowano przykładowe charakterystyki dla wybranej sieci średniego napięcia współpracującej z elektrownią wiatrową. Podstawę służącą do oceny warunków zasilania stanowi Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Spośród wielu parametrów tej oceny podawanych zarówno przez stosowne Rozporządzenie Ministra Gospodarki jak i zawartych w normie PN-EN 50 160, skupiono się na dwóch z nich: odkształceniu krzywej napięcia i wskaźniku migotania światła. Analizę przeprowadzono w oparciu o rzeczywiste pomiary wykonane rejestratorem jakości energii. Z przeprowadzonych pomiarów został wytypowany reprezentatywny okres będący znormalizowaną podstawą czasową dla prezentowanych przebiegów oraz wyznaczonych wskaźników jakości energii.*

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, elektrownia wiatrowa, statystyka

Wstęp

Straty gospodarcze powodowane niedostateczną jakością zasilania są trudne do oszacowania w skali makro, np. w skali kraju, gdyż brak jest regularnie prowadzonych odpowiednich statystyk dotyczących jakości zasilania różnorodnych podmiotów gospodarczych. Pomimo to próby takie są podejmowane. Należy podkreślić fakt dość powszechnego braku świadomości tego, że w wielu przypadkach faktyczną przyczyną awarii urządzeń elektrycznych może być właśnie zła jakość energii.

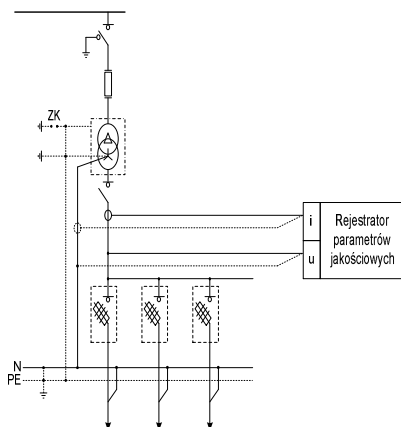
Parametry, według których należy oceniać jakość napięcia zasilającego są podane w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki [10], które jest obowiązującym aktem prawnym-

Spośród około dziesięciu parametrów określonych w normie [8], wykorzystywanych do oceny jakości energii elektrycznej, w referacie omówiono bliżej dwa:

- harmoniczne napięcia zasilającego,
- wskaźnik migotania światła.

Na rysunku 1 przedstawiono ogólny ideowy schemat układu pomiarowego. Głównym elementem systemu pomiarowego był rejestrator typu Fluke 1760. Wymienione urządzenie rejestruje parametry jakości energii elektrycznej w sposób ciągły w oknie pomiarowym 10 min. Rejestracjom podlegają wartości skuteczne napięć i prądów, ich współczynniki odkształcenia THD oraz harmoniczne.

Analizowana elektrownia wiatrowa składa się z wieży wiatraka o wysokości 24,5 m. Turbiny wiatrowe trzy śmigłowe o wymiarach $r = 8,75$ m, wysokość całkowita 33,50 m oraz linii kablowej 0,4 kV. Elektrownia Wiatrowa wyposażona jest w generator asynchroniczny o mocy 110 kW. Napięcie generatorów 400 V, częstotliwość 50 Hz.



Rys. 1. Ogólny ideowy schemat układu pomiarowego dla elektrowni wiatrowej

Wyższe harmoniczne w napięciu zasilającym

Podstawową przyczyną obecności wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym jest pobór prądów odkształconych od przebiegu sinusoidalnego przez odbiorniki nieliniowe przyłączone do sieci. Prądy te powodują pojawianie się spadków napięcia na elementach układu przesyłowego nie tylko dla harmonicznej podstawowej, lecz i dla kolejnych wyższych harmonicznych prądu, w efekcie czego dochodzi do odkształcenia napięcia w rozważanym punkcie zasilania. W przypadku elektrowni wiatrowych źródłem generacji harmonicznych mogą być generatory, układy „miękkiego startu”, przekształtniki, dławiki i przełączalne baterie kondensatorów.

Odształcenie napięcia jest charakteryzowane na dwa sposoby [8, 10]:

- przez względną wartość $U_{h\%}$ harmonicznej rzędu h odniesionej harmonicznej podstawowej U_1 :

$$(1) \quad U_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100 \%$$

- przez całkowity współczynnik odkształcenia (total harmonic distortion):

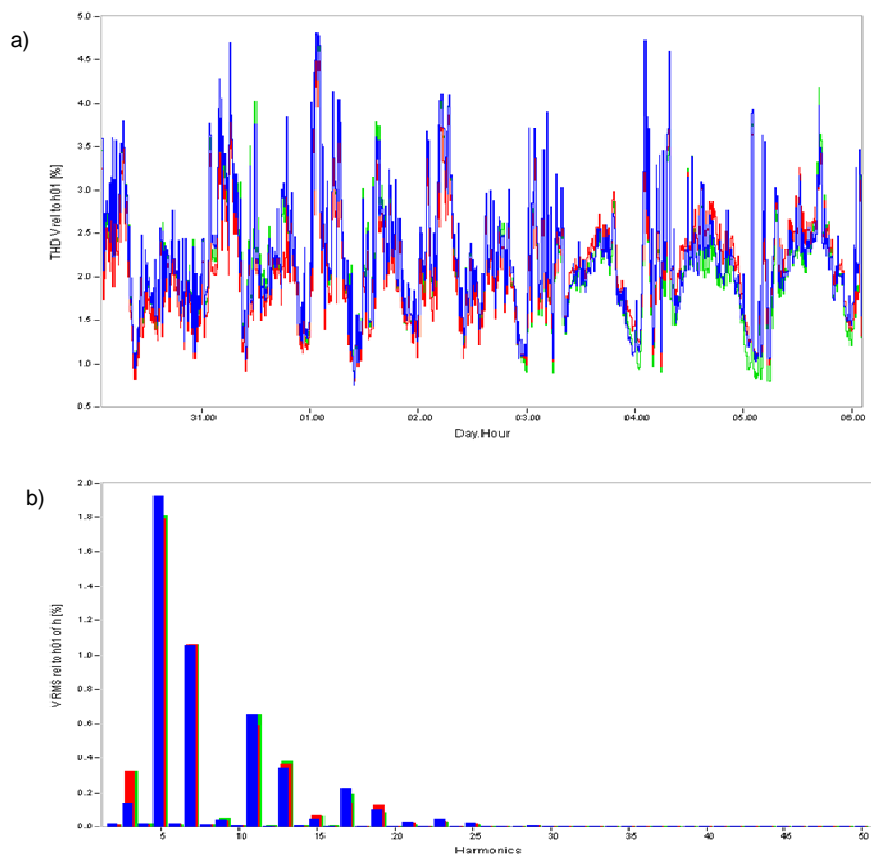
$$(2) \quad THD_{U_1\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \%, \text{ lub } THD_{U_{RMS}\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_{RMS}} \cdot 100 \%$$

gdzie: U_h – wartość skuteczna napięcia harmonicznej rzędu h , U_1 – wartość skuteczna napięcia harmonicznej podstawowej, U_{RMS} – wartość skuteczna badanego napięcia.

Norma [8] i rozporządzenie [10] podają dopuszczalne poziomy zawartości harmonicznych w ten sposób, że oblicza się je wg zależności (1) do $h = 25$ i wg (2) do $h = 40$ jako uśrednione wartości dla 10-cio minutowego okna czasowego. Standardowy czas oceny jakości napięcia wg [8] i [10] wynosi 1 tydzień, czyli 1008 takich 10-cio minutowych odcinków pomiarowych. Dopuszczalne poziomy określa się w ten sposób, że dla normalnych warunków pracy, w okresie każdego tygodnia, w 95% pomiarów nie powinno przekraczać podanych wartości dopuszczalnych.

Wyniki pomiarów przedstawione w pracy mają przede wszystkim na celu ilustrację typowych przebiegów wybranych parametrów jakości energii elektrycznej dla przykładowej elektrowni wiatrowej. Na rysunku 2 przedstawiono tygodniowe przebiegi zmian współczynnika $THD_{U(RMS)\%}$ oraz odpowiadające im spektrum harmonicznych napięcia.

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

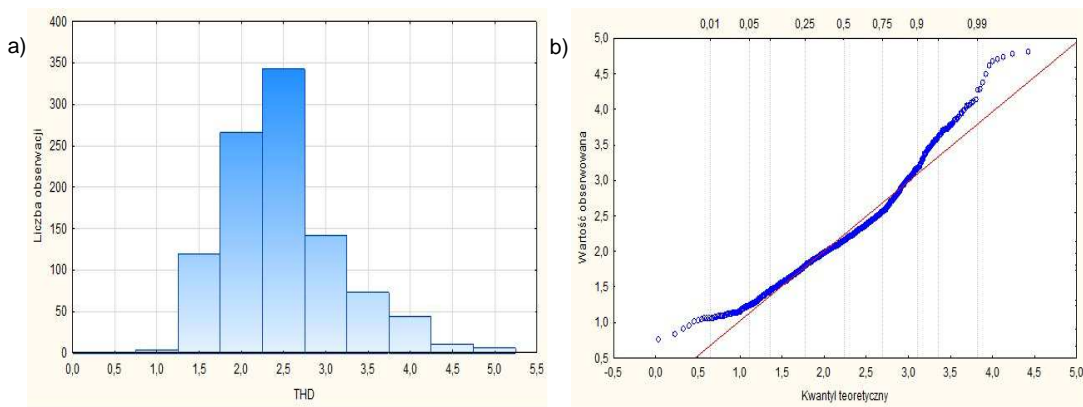


Rys. 2. Tygodniowe przebiegi zmian współczynnika $THDU_{(RMS)\%}$ (a) oraz spektrum harmonicznych napięcia (b)

Analiza przedstawionych przebiegów pozwala stwierdzić, że:

- dominują harmoniczne rzędów 5, 7, 11 i 13 które mogą pochodzić z prądnic siłowni wiatrowych. Drgań harmonicznych należy szukać w przemiennikach częstotliwości.
- na zaprezentowanym przebiegu widoczne są charakterystyczne dobowe zmiany współczynnika,
- wartości wszystkich zmierzonych parametrów mieszczą się w zakresie dopuszczalnych poziomów określonych w Rozporządzeniu [10].

W celu zobrazowania danych wejściowych zaprezentowano histogram oraz wykres kwantyli Q-Q wybranych parametrów jakości energii elektrycznej (rys.3).



Rys. 3. Histogram wartości współczynnika $THD_{U(RMS)\%}$ (oś odciętych - przedziały klasowe, oś rzędnych - liczba obserwacji) (a), wykres kwantyli Q-Q wartości współczynnika $THD_{U(RMS)\%}$ (b)

Zaprezentowany histogram (rys. 3a) charakteryzuje się niewielką asymetrią pozytywnie skośną. Charakter przebiegu zmian otrzymanych wartości jest zbliżony do rozkładu normalnego. Wykres kwantyli Q-Q (rys.3b) wskazuje, że rozkład empiryczny jest niezupełnie zgodny z rozkładem teoretycznym z większymi odchyleniami dla granicznych wartości rozpatrywanych danych.

Poniżej w tabeli 1 zestawiono podstawowe statystyki baz danych wejściowych dla zmian współczynnika $THD_{U(RMS)\%}$.

Tabeli 1. Podstawowe statystyki zmian współczynnika $THD_{U(RMS)\%}$

| Wartość minimum | Wartość maximum | Wartość średnia | Wariancja | Odchylenie standardowe | Współczynnik zmienności | Współczynnik skośności | Współczynnik kurtozy |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| x_{\min} | x_{\max} | \bar{x} | σ^2 | S | CV [%] | SK | K |
| 0,76 | 4,81 | 2,23 | 0,46 | 0,68 | 30,49 | 0,82 | 0,92 |

Duża wartość współczynnika zmienności (30,49%) świadczy o znacznym zróżnicowaniu danych. Badany rozkład jest bardziej smukły niż rozkład normalny, gdyż wartość kurtozy jest większa od zera. Wartość dodatnia współczynnika skośności świadczy o występowaniu skośności prawostronnej. Wartości współczynnika kurtozy wskazuje, że rozkład zmian współczynnika $THD_{U(RMS)\%}$ powinien wykazywać podobieństwo do rozkładu normalnego – skośność może trochę zakłócać badany odbiór.

Ocena jakości w oparciu o wskaźnik migotania światła

Elektrownie wiatrowe mogą być źródłem powstawania migotania zarówno w czasie normalnej pracy jak i w czasie różnego rodzaju czynności łączeniowych np. w trakcie zmiany konfiguracji uzwojeń generatorów. Gwałtowne zmiany mocy wyjściowej z turbiny wiatrowej, załączanie generatora i łączenie baterii kondensatorów powodują zmiany

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

wartości skutecznej napięcia. Zjawisko migotania światła może być również spowodowane zawartością harmonicznych napięć i prądów.

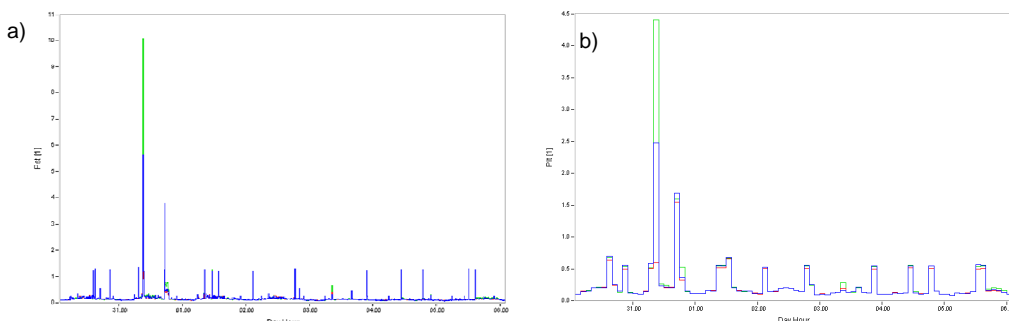
Zjawiskiem migotania światła nazywa się zmiany napięcia mające charakter regularnych wahań, utrzymujących się przez dłuższy czas, które mogą powodować zmiany strumienia świetlnego, wytwarzanego przez elektryczne źródła światła. Zjawisko to wpływa niekorzystnie na samopoczucie i koncentrację osób pracujących w takich warunkach [7], a jego miarą jest tzw. wskaźnik migotania światła, którego dopuszczalne poziomy są określane w rozporządzeniu [10]. Określenie dopuszczalnych poziomów wskaźnika migotania światła również dla napięć średnich i wysokich, czyli takich przy których nie są zasilane bezpośrednio źródła światła, świadczy o dużym znaczeniu tego parametru i o możliwości propagacji zakłóceń na różnych poziomach napięcia w całej sieci rozdzielczej. W analizie, której celem jest sprawdzenie, czy efekt migotania światła wywołany przez badany obiekt będzie mieścił się w dopuszczalnym zakresie, ważnymi parametrami są: moc znamionowa urządzenia, moc zwarciowa sieci oraz charakter zmian napięcia powodowanych pracą urządzenia.

Zasady obliczania wskaźnika migotania światła są określone w normie [8]. Wskaźnik ten składa się z dwóch elementów:

- wskaźnika krótkookresowego migotania światła P_{st} , wyznaczanego dla czasu obserwacji równego 10 minut; wyznaczanie to można przeprowadzić na cztery różne sposoby, zależnie od rodzaju wahań napięcia i zastosowanej metody pomiaru bądź obliczeń.
- wskaźnika długookresowego migotania światła P_{lt} wyznaczanego dla czasu obserwacji równego 2 godziny i obliczanego z wykorzystaniem kolejnych 12 wskaźników P_{st} dla tego czasu obserwacji, ze wzoru:

$$(3) \quad P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st,i}^3}{12}}$$

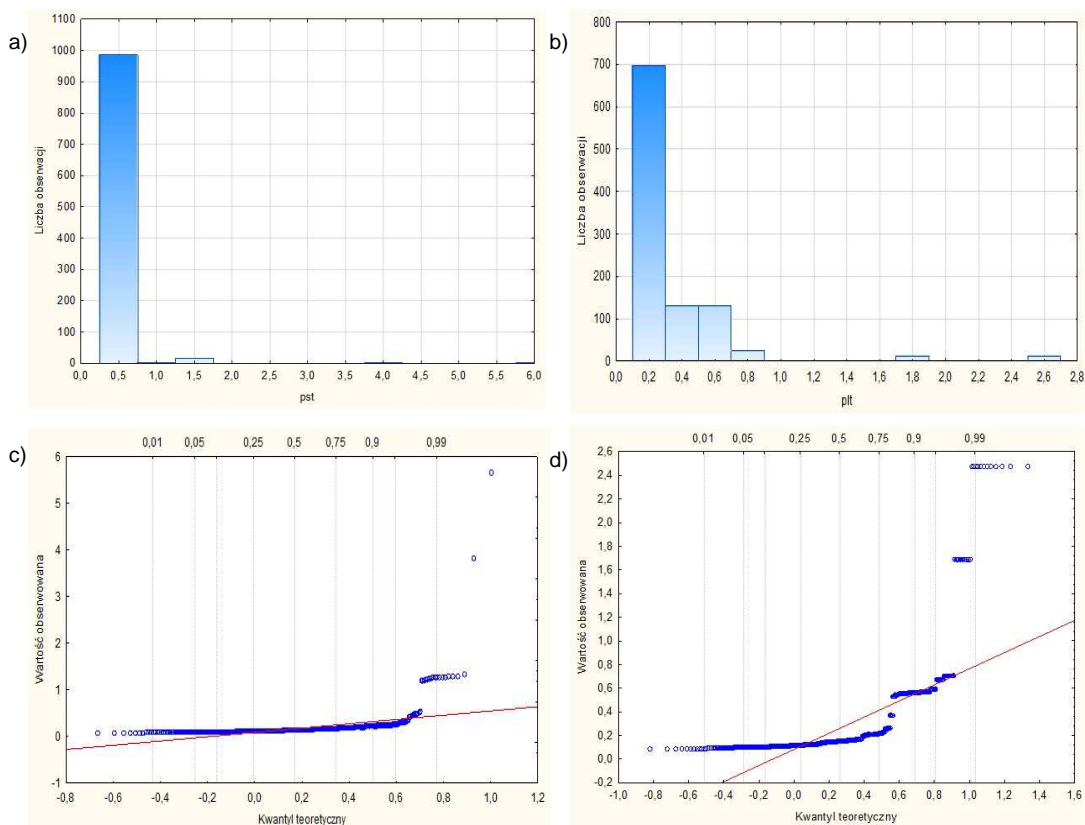
Na rysunku 4 przedstawiono zarejestrowane wartości krótkookresowego oraz długookresowego wskaźnika migotania światła otrzymane podczas pomiarów.



Rys. 4. Wskaźniki migotania światła:
wskaźnik krótkookresowy P_{st} (a), wskaźnik długookresowy P_{lt} (b)

Przedstawione powyżej wielkości wskaźnika długookresowego migotania światła wyznaczone na podstawie zarejestrowanych napięć, przekraczają dopuszczalne wartości graniczne przewidziane w przypadku analizy wahań napięcia. Uwzględniając, że przez 95 % czasu każdego tygodnia wskaźnik długookresowego migotania światła P_{lt} spowodowanego wahaniami napięcia zasilającego nie powinien być większy od 1 przypadki przekraczające mieszczą się w 5 % wytycznych dotyczących oceny warunków zasilania zawartych w rozporządzeniu [10].

W celu zobrazowania danych wejściowych zaprezentowano histogram oraz wykres kwantyli Q-Q wskaźnik krótkookresowy P_{st} (rys.5 a,c) oraz wskaźnik długookresowy P_{lt} (rys.5 b,d).



Rys. 5. Histogram wartości wskaźnika migotania światła (oś odciętych - przedziały klasowe, oś rzędnych - liczba obserwacji) (a,b), wykres kwantyli Q-Q wskaźnika migotania światła (c,d)

Zaprezentowane histogramy (rys.5 a,b) charakteryzuje się niewielką asymetrią pozytywnie skośną i jednoskrzydłową. Charakter przebiegu zmian otrzymanych wartości jest zbliżony do rozkładu normalnego. Wykres kwantyli Q-Q (rys.5 b,d) wskazuje, że rozkład empiryczny jest niezgodny z rozkładem teoretycznym z większymi odchyleniami dla granicznych wartości rozpatrywanych.

Poniżej w tabeli 2 zestawiono podstawowe statystyki baz danych wejściowych dla zmian wskaźnika długookresowego migotania światła.

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Tabela 2. Podstawowe statystyki zmian wskaźnika migotania światła

| | Wartość minimum | Wartość maximum | Wartość średnia | Wariancja | Odchylenie standardowe | Współczynnik zmienności | Współczynnik skośności | Współczynnik kurtozy |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| | x_{\min} | x_{\max} | \bar{x} | σ^2 | S | CV [%] | SK | K |
| P_{st} | 0,06 | 5,64 | 0,17 | 10,20 | 0,26 | 152,87 | 13,52 | 243,43 |
| P_{lt} | 0,08 | 2,47 | 0,26 | 0,11 | 0,33 | 128,86 | 4,55 | 24,69 |

Bardzo duża wartość współczynnika zmienności (152,87% dla P_{st} , 128,86% dla P_{lt}) świadczy o znacznym zróżnicowaniu danych. Badany rozkład jest bardziej smukły niż rozkład normalny, gdyż wartość kurtozy jest większa od zera. Wartość dodatnia współczynnika skośności świadczy o występowaniu skośności prawostronnej. Wartości współczynnika kurtozy wskazują, że rozkład zmian wskaźnika długookresowego migotania światła powinien wykazywać podobieństwo do rozkładu normalnego – skośność może trochę zakłócać badany odbiór.

Podsumowanie

Spektrum wyższych harmonicznych w sieciach średniego napięcia współpracujących z elektrownią wiatrową charakteryzuje się dominującym udziałem harmonicznych rzędów 5, 7, 11 i 13 które mogą pochodzić z prądnic siłowni wiatrowych. Na zaprezentowanym przebiegu współczynnika $THD_{U(RMS)}$ % widoczne są charakterystyczne dobowe zmiany współczynnika co może świadczyć, że w wytypowany reprezentatywny okres będący znormalizowaną podstawą czasową praca prezentowanej elektrowni wiatrowej nie jest związana z prędkością wiatru.

Na podstawie zaprezentowanych histogramów można wnioskować, że w przybliżeniu w sieci średniego napięcia współpracujące z elektrownią wiatrową pracują z niewielką asymetrią (statystyczną). Taki przebieg zmian określany jest w statystyce jako „pozytywnie skośny”. Charakter przebiegu zmian otrzymanych wartości jest zbliżony do rozkładu normalnego.

Można wnioskować (dla zmian wskaźnika migotania światła), iż dla sieci średniego napięcia współpracującej z odnawialnymi źródłami energii będzie występować jedna i zarazem dominująca klasa modalna, która zawierać się będzie w przedziale od 0 do 0,5. Sieć taka charakteryzować się będzie bardzo dużym zróżnicowaniem danych dochodzącym do kilkuset procent. Grupy odnawialnych źródeł energii charakteryzują się bardziej smuklejszym rozkładem niż rozkład normalny.

Literatura

1. Baggini A., 2008. Handbook of Power Quality. John Wiley & Sons, Chichester,
2. Chapman D.: Koszty. Koszty niskiej jakości zasilania. Jakość zasilania – poradnik 2.1, 2001, www.lpqj.org.
3. Bień A., Metrologia jakości energii elektrycznej w obszarze niskoczęstotliwościowych zaburzeń napięcia sieci, AGH, Uczelniane Wydawnictwa naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2003
4. Dobosz M., Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001

5. Hanzelka Z., Jakość Energii Elektrycznej, Część 3: Wahania napięcia, Wydawnictwo AGH
6. Lubośny Z., Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 2006 r., ISBN 83-204-3151- 4
7. Schlabbach J., Mombauer W., Powe Quality, VDE Schriftenreihe Normen verständlich 127, VDE Verlag Berlin, 2008.
8. PN-EN 50160: 2010. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
9. PN-EN 61000-4-15: 2003 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Metody badań i pomiarów - Miernik migotania światła - Specyfikacja funkcjonalna i projektowa.
10. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z dnia 29 maja 2007, poz. 623).

Autor: dr inż. Marta Bątkiewicz-Pantula; Politechnika Wrocławska, Instytut Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: marta.batkiewicz-pantula@pwr.wroc.pl