

Badania zaburzeń elektromagnetycznych na przyłączach energetycznych odnawialnych źródeł energii

Streszczenie. W referacie przedstawiono niektóre problemy dotyczące badań zaburzeń elektromagnetycznych wytwarzanych przez odnawialne źródła energii. Omówiono rodzaje tych zaburzeń, koncentrując się głównie na zaburzeniach impulsowych, podano skutki ich oddziaływania na ludzi i środowisko. Przedstawiono metody badań zaburzeń, stosowane urządzenia pomiarowe oraz przykładowe wyniki pomiarów zaburzeń, występujących w obwodach sieci energetycznej generatorów wiatrowych i elektrowni wodnej.

Abstract. The paper presents some problems concerning the tests of electromagnetic disturbances produced by renewable energy sources. There is a description of the disturbances types, focusing mainly on impulse disturbances and the possible impact on people and the environment. Next, the evaluation methods and measurement equipment are discussed, followed by results of measurements of disturbances occurring in the main power circuits of wind and small hydro-electric power plants (*The tests of electromagnetic disturbances on the power connections of renewable energy sources*).

Słowa kluczowe: zaburzenia elektromagnetyczne, odnawialne źródła energii.

Keywords: electromagnetic disturbances, renewable energy sources.

doi:10.12915/pe.2014.05.55

Wprowadzenie

W procesie wytwarzania energii elektrycznej przez odnawialne źródła energii takie jak elektrownie wiatrowe i wodne, występują niekorzystne efekty w postaci zaburzeń elektromagnetycznych, które nakładają się na generowany sinusoidalny przebieg sieciowy. Zaburzenia te są produktem ubocznym tego procesu. Mają one różnorodny charakter. Najczęściej są to przebiegi impulsowe – pojedyncze impulsy lub ich wiązki, występujące w sposób przypadkowy lub okresowy. Impulsy te mają różne kształty, przy czym najczęściej zbliżone są do przebiegu wykładniczego lub oscylacyjnego tłumionego. Występują też zapady i zaniki napięcia sieciowego, przy czym niektóre z nich powtarzają się z określoną częstotliwością. Zdarza się również dość często, że wytwarzane sinusoidalne przebiegi napięciowe są znacznie zniekształcone. Występują duże poziomy składanych harmonicznych napięć sieciowych.

Obecność zaburzeń w obwodach sieci elektroenergetycznych stanowi zagrożenie nie tylko dla urządzeń i elementów tej sieci, ale przede wszystkim dla zasilanych z niej urządzeń elektrycznych. Szczególnie narażane są te odbiorniki energii, które znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie i pobierają zasilanie bezpośrednio z generatorów odnawialnych źródeł energii. Możliwość zakłócenia pracy określonych urządzeń zależy nie tylko od ich odległości od źródła zaburzeń, ale i od właściwości kanału przewodzącego zaburzenia, a także od odporności tych urządzeń, w tym od skuteczności zastosowanych w nich środków ochrony przeciwzakłóceń. Szczególnie niekorzystne skutki mogą wywołać zaburzenia impulsowe. Stosunkowo łatwo przenikają one do wnętrza urządzeń, najczęściej przez ich obwody zasilania. Są dość trudne do słumienia. Wraz ze wzrostem poziomów tych zaburzeń obserwuje się stany zakłóceń pracy wyrobów elektrycznych, a następnie występują ich uszkodzenia. Te niespodziewane zakłócenia i awarie w pracy urządzeń elektrycznych mogą powodować różne zagrożenia dla osób je obsługujących lub znajdujących się w pobliżu. Mogą to być porażenia prądem elektrycznym wynikające z przebicia izolacji i pojawienia się niebezpiecznego napięcia w miejscach dotyku operatora lub uszkodzenia ciała spowodowane eksplozją przepalonych elementów lub niespodziewaną, nieprawidłową pracą maszyn elektrycznych i automatów przemysłowych. W wyniku zwarć i przebic w układach

energetycznych, których źródłem mogą być pojedyncze impulsy zakłócające dużej energii, występuje często głośny trzask i efekt świetlny w postaci wyładowania powietrznego. Powoduje to często gwałtowną niekontrolowaną reakcję osób znajdujących się w pobliżu, w wyniku której może dojść do wypadków powodujących znaczne obrażenia ciała. Zwarcia i przebicia stwarzają również niebezpieczeństwo powstania pożaru, prowadzącego do poparzeń i zniszczenia mienia.

Zjawiska oddziaływania na organizm człowieka pól elektromagnetycznych i napięć sieci zasilającej są dość obszernie omówione w literaturze (np. [1], [2]). Jednak publikacje te skupiają się głównie na przedstawieniu tych oddziaływań dla pól i sygnałów harmonicznych. Natomiast oddziaływanie na organizm człowieka pól i sygnałów elektrycznych impulsowych jest stosunkowo mało rozpoznane. W przypadku pól elektromagnetycznych można powiedzieć, że organizm człowieka potrafi łatwiej uruchomić pewne mechanizmy obronne i dostosować się do narażeń w postaci sygnałów ciągłych niż w przypadku sygnałów impulsowych powtarzających się z określoną częstotliwością. Uruchomienie tych mechanizmów zawsze wymaga pewnego czasu, co powoduje, że krótkie powtarzające się zaburzenia impulsowe łatwiej wywołują szkodliwe efekty niż zaburzenia ciągłe [3].

W związku z powyższym istnieje potrzeba wykonywania badań zaburzeń wytwarzanych przez odnawialne źródła energii tak, aby rozpoznać faktycznie występujące zagrożenie oraz zastosować właściwe metody i środki zmniejszające ryzyko wystąpienia tych niekorzystnych efektów ([4], [5]). Badania te mają m. in. na celu określenie rodzaju i parametrów występujących zaburzeń oraz częstości ich występowania. Analiza wyników tych badań umożliwi m. in. ocenę stopnia zagrożeń, jakie powodują zaburzenia występujące w danej sieci, dla dołączonych do niej urządzeń elektrycznych i elektronicznych oraz osób znajdujących się w pobliżu. Przyczyni się to do zastosowania właściwych środków zabezpieczających i ochronnych.

Metody badań zaburzeń elektromagnetycznych w sieciach energetycznych

Normy określające metodykę pomiaru parametrów jakościowych energii elektrycznej

Badania zaburzeń elektromagnetycznych w obwodach sieci energetycznej są ściśle powiązane z badaniami

jakości energii elektrycznej. Badania te wykonuje się najczęściej według metod opisanych w normie PN-EN 61000-4-30 [6]. W normie tej przedstawiono metody pomiaru określonych parametrów jakościowych energii elektrycznej i sposoby interpretacji ich wyników, a także wytyczne do wyznaczania niepewności pomiaru.

Drugą przydatną normą związaną z badaniami jakością energii elektrycznej jest PN-EN 50160 [7]. Podaje ona wymagania na parametry jakościowe napięcia zasilającego w sieciach rozdzielczych niskiego i średniego napięcia w normalnych warunkach pracy. Są to te same parametry jak wymienione w normie PN-EN 61000-4-30. W zakresie sygnałów przejściowych norma PN-EN 50160 wyróżnia przepięcia:

- dorywcze o częstotliwości sieciowej (o stosunkowo długim czasie trwania, spowodowane np. nagłym zmniejszeniem obciążenia lub zwarciami),
- przejściowe (krótkotrwałe przepięcia oscylacyjne lub nieoscylacyjne, zwykle silnie tłumione, trwające kilka milisekund lub dłużej).

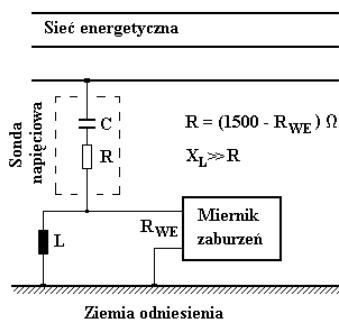
W badaniach zaburzeń elektromagnetycznych pochodzących od turbozespołów wiatrowych wykorzystywana jest norma PN-EN 61400-21 [8]. Norma wymienia następujące parametry charakteryzujące jakość energii dostarczonej przez turbozespół wiatrowy:

- dane znamionowe (moc czynna, bierna, pozorna, napięcie i prąd znamionowy),
- maksymalna moc dopuszczalna,
- maksymalna moc zmierzona,
- wahania napięcia (wskaźnik migotania światła podczas pracy ciągłej, charakterystyki rodzajów procesów łączeniowych),
- poziomy harmonicznych prądu turbozespołu podczas pracy ciągłej.

W rozdziale dotyczącym procedur pomiarowych norma PN-EN 61400-21 określa warunki badań, w sposób ogólny charakteryzuje układy pomiarowe oraz podaje pewne zalecenia dotyczące postępowania przy pomiarach i obliczeniach poszczególnych parametrów.

Układy i urządzenia do pomiaru zaburzeń impulsowych

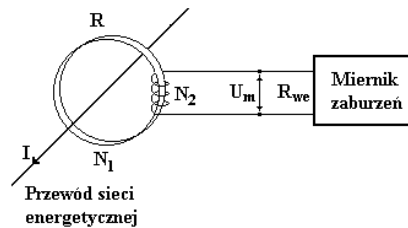
Zaburzenia impulsowe występujące w sieciach energetycznych są sygnałami napięciowymi występującymi między jej obwodami lub prądami płynącymi w tych obwodach. Sygnały napięciowe są mierzone między przewodem fazowym a przewodem neutralnym lub uziemiającym, a także pomiędzy przewodami fazowymi. Sygnały prądowe to prądy poszczególnych faz.



Rys.1. Schemat układu do pomiaru niesymetrycznych napięć zaburzeń impulsowych w sieciach energetycznych

Charakterystyka widmowa tych sygnałów najczęściej rozciąga się w zakresie do kilkudziesięciu MHz. Stąd też na ogół wykonuje się badania tego typu zaburzeń jako pomiary napięć i prądów w zakresie częstotliwości do około 30 MHz. Do pomiarów tych używa się mierników zaburzeń, wyposażonych w odpowiednie sondy napięciowe lub

prądowe. Miernikami tymi mogą być analizatory widma, odbiorniki pomiarowe i oscyloskopy. Pozwalają one na wykonywanie badań tych zaburzeń w dziedzinie czasu i częstotliwości.



Rys.2. Schemat układu do pomiaru prądów zaburzeń w sieciach energetycznych

Rys. 1 przedstawia schemat układu do pomiaru niesymetrycznych (wspólnych) napięć zaburzeń impulsowych, występujących w określonych punktach sieci energetycznej [9]. Miernik zaburzeń mierzy napięcie w. cz. występujące między danymi punktem sieci energetycznej, a ziemią odniesienia. Pomiar następuje przez sondę napięciową, która m in. zapewnia silne tłumienie sygnału o częstotliwości 50 Hz. Rezystor R posiada tak dobraną wartość rezystancji, aby całkowita rezystancja między przewodem, na którym jest wykonywany pomiar napięcia zaburzeń, a ziemią odniesienia wynosiła 1500Ω (zgodnie z zaleceniami normy [9]). Cewka indukcyjna L może być stosowana ze względów bezpieczeństwa. Jej impedancja powinna być znacznie większa od wartości rezystancji R .

Rys. 2 przedstawia schemat układu do pomiaru prądów zaburzeń w sieciach energetycznych [9]. Miernik zaburzeń współpracuje z sondą prądową, która wykonana jest w postaci cęgów i zakładana na badany przewód. Taka konstrukcja sondy umożliwi przeprowadzanie pomiarów bez odłączania przewodów sieciowych. Sonda ta stanowi transformator prądowy (o przekładni N_1 / N_2), w którym uzwojeniem pierwotnym jest badany przewód, a uzwojenie wtórne jest nawinięte na ferromagnetyczny pierścień.

Opracowano również i są stosowane specjalistyczne urządzenia do pomiarów i rejestracji zaburzeń w sieciach energetycznych (w tym również impulsowych), nazywane często testerami, rejestratorami zakłóceń sieciowych lub analizatorami jakości sieci zasilającej. Posiadają one zestaw własnych sond napięciowych i prądowych oraz są wyposażone w wewnętrzny akumulator do podtrzymania zasilania bloku pomiarowego w czasie zaników i wahań napięcia sieciowego. Niektóre z tych urządzeń wyposażone są w specjalistyczne oprogramowanie umożliwiające analizę i przetwarzanie wyników pomiarowych, a także ich wygodną prezentację.

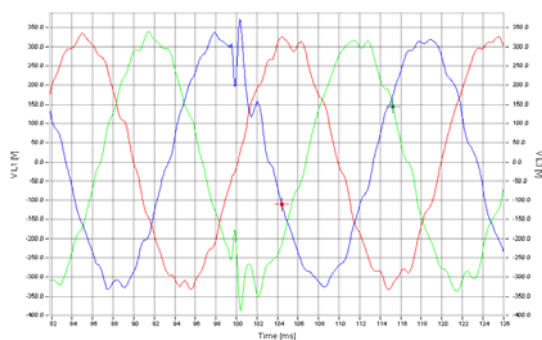
Wyniki pomiarów zaburzeń elektromagnetycznych wytwarzanych przez odnawialne źródła energii

Poniżej podano przykładowe wyniki pomiarów zaburzeń elektromagnetycznych wytwarzanych przez odnawialne źródła energii, które zostały przeprowadzone przez specjalistów z Instytutu Tele- i Radiotechnicznego z Warszawy. Wykonali oni kilka serii tych badań na obiektach zlokalizowanych w różnych miejscach Polski (generatory wiatrowe oraz jedna mała elektrownia wodna). Mierzono parametry jakościowe energii elektrycznej, w tym również napięcia zaburzeń impulsowych. Pomiary te przeprowadzono na wszystkich trzech fazach zasilania w stosunku do szyny neutralnej. Zastosowane metody pomiarowe były zgodne z normą PN-EN 61000-4-30:2005. Do pomiarów zastosowano analizator sieci zasilających typ 1760 firmy Fluke z zestawem sond napięciowych i prądowych.

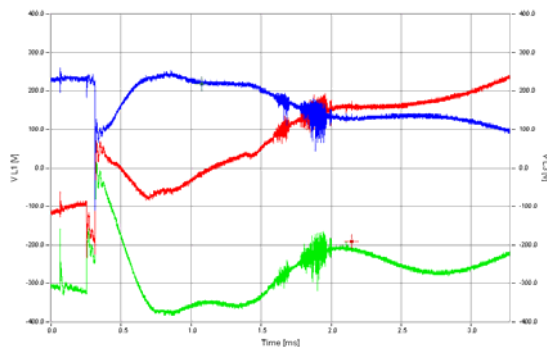
W miejscach dołączenia sond analizatora mogły występować również zaburzenia elektromagnetyczne pochodzące od dołączonych do tej sieci różnych odbiorników energii elektrycznej. Ze względu na fakt dokonywania pomiarów po stronie niskiego napięcia transformatora oraz ze względu na znaczne odległości pomiędzy miejscami pomiarowymi a miejscami dołączenia odbiorników energii wpływ tych zaburzeń, szczególnie o charakterze impulsowym lub oscylacyjnym, można uznać za pomijalny.

Wyniki pomiarów przeprowadzonych w małej elektrowni wodnej oraz ich analiza

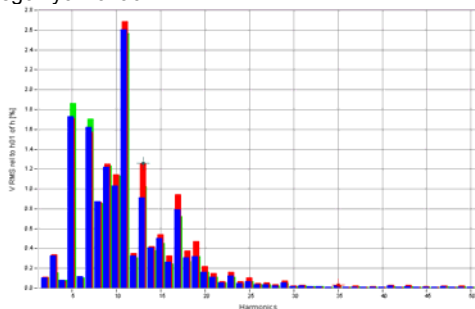
Obiektem pomiarów było przyłącze sieci elektroenergetycznej trójfazowej niskiego napięcia, dołączone do wyjścia generatora współpracującego z turbiną w małej elektrowni wodnej. Elektrownia ta posiadała 4 turbiny wodne. Moc zainstalowana wynosi 140 kW. W trakcie pomiarów monitorowano wyjście jednego z pracujących generatorów. Wybrane wyniki tego monitorowania przedstawiono na rysunkach 3 - 5.



Rys.3. Fragment przebiegów napięciowych trzech faz z widocznymi zaburzeniami impulsowymi (poszczególne fazy oznaczono innym kolorem)



Rys.4. Wybrane przebiegi zaburzeń impulsowych na poszczególnych fazach



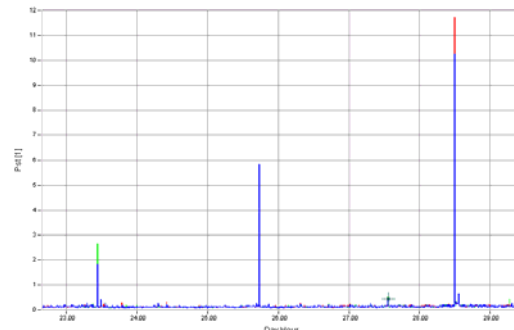
Rys.5. Uśrednione wartości poszczególnych harmonicznych napięć fazowych w stosunku do uśrednionej wartości pierwszej harmonicznej (w %)

Otrzymane wyniki badań poddano analizie przy zastosowaniu kryteriów określonych w dokumencie [10]. Analiza ta pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

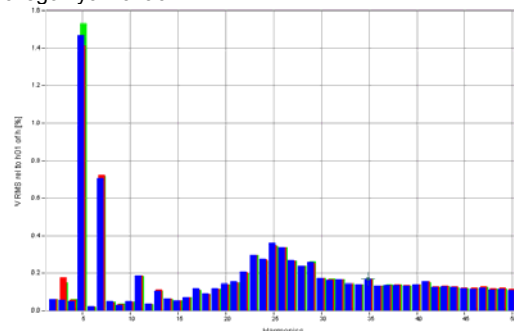
- Zakres zmian częstotliwości wytwarzanego napięcia wynosił od 49,94 do 50,08 Hz. Jest to znacznie poniżej zakresu dopuszczalnego $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$.
- Zmierzony zakres zmian wartości napięcia znamionowego (224 V – 233 V) był również znacznie poniżej dopuszczalnego ($U_{zn} \pm 10 \%$).
- Wartości współczynnika migotania światła P_{it} przekraczały wartości dopuszczalne.
- Zarejestrowane wartości składowych harmonicznych napięcia zasilającego przekraczały wartości dopuszczalne w przypadku 9 i 11 harmonicznej. Szczególnie duże były wartości 11 harmonicznej. Również współczynnik odkształcenia napięcia zasilającego THD przekraczał wartość dopuszczalną (8 %).
- W okresie monitorowania zarejestrowano dużą liczbę zaburzeń impulsowych nakładających się na sinusoidalny przebieg napięcia zasilającego. Zaburzenia te miały polaryzację dodatnią i ujemną oraz amplitudę nieprzekraczającą 500 V. Ich przebieg na ogół był zbliżony do oscylacji tłumionych.

Wyniki pomiarów przeprowadzonych w jednej z elektrowni wiatrowej oraz ich analiza

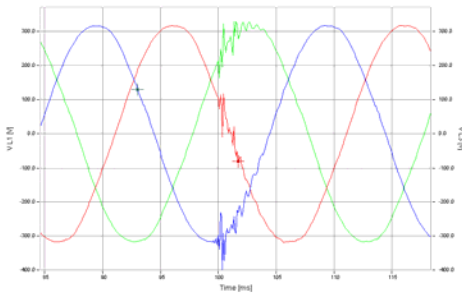
Obiektem pomiarów było przyłącze sieci elektroenergetycznej trójfazowej, będące zaciskami transformatora średniego napięcia połączonego bezpośrednio z generatorem wiatrowym. Pomiar przeprowadzono dołączając sondy urządzenia pomiarowego po stronie niskiego napięcia tego transformatora. Badany generator był typu synchronicznego i posiadał moc 500 kW. Wysokość wiatraka wynosiła 72 m. Wybrane wyniki tych pomiarów przedstawiono na rys. 6 - 9.



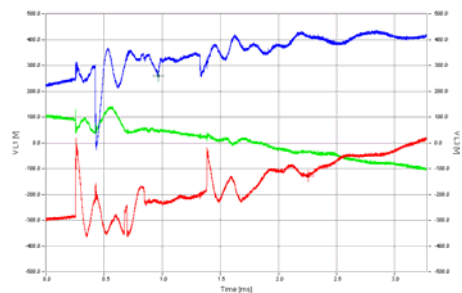
Rys.6. Wartości współczynników migotania światła (P_{st}) na poszczególnych fazach



Rys.7. Uśrednione wartości poszczególnych harmonicznych napięć fazowych w stosunku do uśrednionej wartości pierwszej harmonicznej (w %)



Rys.8. Zaburzenia impulsowe nałożone na sinusoidalne przebiegi sieci zasilającej



Rys.9. Przykładowe przebiegi zaburzeń impulsowych zarejestrowanych w badanej sieci elektroenergetycznej

Otrzymane wyniki badań poddano analizie przy zastosowaniu kryteriów określonych w dokumencie [10]. W jej wyniku sformułowano następujące wnioski:

- Zakres zmian częstotliwości wytwarzanego napięcia wynosił od 49,9 do 50,1 Hz. Jest to znacznie poniżej zakresu dopuszczalnego 50 Hz \pm 1 %.
- Zakres zmian wartości napięcia znamionowego był również poniżej dopuszczalnego, z wyjątkiem jednego przypadku, kiedy to wystąpił spadek wartości napięcia do około 125 V.
- W okresie monitorowania wytwarzanego napięcia stwierdzono trzykrotne przekroczenie wartości dopuszczalnej współczynnika migotania światła P_{fl} (w jednym przypadku było to przekroczenie bardzo znaczne – 5 razy).
- Zarejestrowane wartości składowych harmonicznych napięcia zasilającego były poniżej wartości dopuszczalnych, przy czym najbardziej zbliżone do dopuszczalnych były wartości piątej i siódmej harmonicznej. Poniżej wartości dopuszczalnej (8 %) był również współczynnik odkształcenia napięcia zasilającego THD.
- W okresie monitorowania zarejestrowano dużą liczbę zaburzeń impulsowych nakładających się na sinusoidalny przebieg napięcia zasilającego. Zaburzenia te miały polaryzację dodatnią i ujemną oraz amplitudę nieprzekraczającą 500 V. Ich przebiegi czasowe zbliżone były do oscylacji tłumionych.

Podsumowanie

W wyniku analizy rezultatów przeprowadzonych badań stwierdzono, że istnieje potrzeba kontynuacji tej tematyki, szczególnie w zakresie opracowania metod poprawy jakości energii elektrycznej wytwarzanej przez źródła odnawialne, w tym opracowanie sposobów zmniejszenia

wartości niektórych składowych harmonicznych napięcia wytwarzanego przez generatory wiatrowe i wodne (dotyczy to w szczególności 5, 7, 9 i 11 harmonicznej). Występuje też potrzeba opracowania sposobów zmniejszenia poziomów zaburzeń impulsowych towarzyszących procesowi wytwarzania tej energii.

Analizując wyniki przeprowadzonych badań stwierdzono, że istnieje korelacja pomiędzy poziomami rejestrowanych zaburzeń elektromagnetycznych, a nieprawidłowościami występującymi w pracy urządzeń wytwarzających energię elektryczną. Możliwym się wydaje określenie sposobów identyfikacji symptomów uszkodzeń urządzeń wytwarzających energię elektryczną na podstawie analizy zaburzeń elektromagnetycznych wytwarzanych przez te źródła. Weryfikacja tej hipotezy wymaga jednak przeprowadzenia wielu dalszych badań i analiz.

LITERATURA

- [1] Gryz K., Karpowicz J., Pola elektromagnetyczne w środowisku pracy. Monografia z serii: *Zarządzanie Bezpieczeństwem i Higieną Pracy*. Warszawa, CIOP (2000)
- [2] SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks), *Report on Possible Effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health*, Brussels March (2007)
- [3] Kubacki R., Uwarunkowania biofizyczne oraz dopuszczalne wartości elektromagnetycznego promieniowania impulsowego. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* (2008) nr 4
- [4] Kandyba A., Kalus M., Kurytnik I.P., Synthesis and simulation of stator rms voltage control circuit of cage induction machine operating as generator in small hydropower plant supplying off-grid customers. *Przegląd Elektrotechniczny* (2012) nr 6, 138-141.
- [5] Biernacki Z., Drózd T., Posyłek Z., Rakus P., Badania zakłóceń elektromagnetycznych emitowanych przez maszyny komutatorowe – w aspekcie ich ograniczania. *Elektronizacja* (2001), nr 9, 13-16
- [6] Norma PN-EN 61000-4-30:2005 - Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 4-30: Metody badań i pomiarów. Metody pomiaru jakości energii
- [7] Norma PN-EN 50160:2002 - Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych
- [8] Norma PN-EN 61400-21:2009 - Turbozespoły wiatrowe. Pomiar i ocena parametrów jakości energii dostarczonej przez turbozespoły wiatrowe przyłączone do sieci elektroenergetycznej
- [9] Norma PN-EN 55016-1-1:2010 - Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiaru zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia - Część 1-1: Aparatura do pomiaru zaburzeń radioelektrycznych i do badań odporności - Aparatura pomiarowa
- [10] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r., w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. nr 93, poz. 623).

Autorzy: Prof. dr hab. Inż. Igor Piotr Kurytnik, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, e-mail: ikurytnik@ath.bielsko.pl; dr inż. Tomasz Drózd, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116 b, 30-149 Kraków, e-mail: tomasz.drozd@ur.krakow.pl; dr inż. Stefan Kuciński, Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, e-mail: stefan.kucinski@itr.org.pl