

**Piotr Gnaciński, Janusz Mindykowski,
Marcin Pepliński, Tomasz Tarasiuk**
Akademia Morska w Gdyni

KONCEPCJA NOWEJ METODY OCENY JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

CONCEPT OF NEW METHOD OF POWER QUALITY ASSESSMENT

Streszczenie: Artykuł dotyczy nowej koncepcji oceny jakości napięcia w okrętowych systemach elektroenergetycznych. Opracowanie nowej metody oparte będzie na ocenie obciążeń cieplnych silników indukcyjnych, w warunkach jednoczesnego występowania różnych zaburzeń jakości napięcia: odchylenia napięcia i częstotliwości, asymetrii napięcia, harmonicznych, subharmonicznych i interharmonicznych napięcia. Zostaną uwzględnione zarówno zmienność w czasie zaburzeń jakości napięcia, jak również cieplne procesy przejściowe w maszynach indukcyjnych. Metoda zostanie zweryfikowana na podstawie szacunkowej średniej szybkości starzenia cieplnego układów izolacyjnych silników indukcyjnych w warunkach zasilania napięciem o zaniżonej jakości. Przewidziano zastosowanie prezentowanej metody w analizatorach jakości napięcia oraz w normach dotyczących jakości napięcia i przepisach okrętowych towarzystw klasyfikacyjnych.

Abstract: The paper presents a concept of a new method of power quality assessment dedicated for ship power systems. The method is based on estimation of thermal loads of an induction machine under simultaneous presence of various power quality disturbances: voltage deviation, frequency deviation, voltage unbalance, voltage harmonics, subharmonics and interharmonics. The variation in time of power quality disturbances and machines thermal transients will be taken into account. The method will be verified on the grounds of assessed average rate of thermal ageing of insulation systems of induction motors supplied with voltage of lowered quality. The new method might be implemented in power quality analyzers as well as in power quality standards and regulation of ship classification societies.

Słowa kluczowe: *jakość energii elektrycznej, maszyny indukcyjne, temperatura uzwojeń*
Keywords: *power quality, induction machines, winding temperature*

1. Wstęp

Okrętowe systemy elektroenergetyczne należą do grupy autonomicznych systemów elektroenergetycznych, charakteryzujących się ograniczoną liczbą źródeł energii elektrycznej, stosunkowo małą mocą zwarciovą oraz mocą największych odbiorników porównywalną z mocą prądnic. W systemach okrętowych stosuje się specyficzne rozwiązania, takie jak np. układy prądnic wałowych [8]. Ponadto, systemy okrętowe charakteryzują się dużym nasyceniem odbiornikami nieliniowymi [8] oraz niekorzystnymi warunkami środowiskowymi – np. obecnością mgły solnej, wysoką lub bardzo niską temperaturą otoczenia.

Skutkiem stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych oraz niekorzystnych warunków eksploatacyjnych jest powszechne występowanie znaczących zaburzeń jakości napięcia – a w szczególności odkształcenia krzywej przebiegu napięcia oraz odchylenia częstotliwości od wartości znamionowej [9]. W celu ochrony okrętowych odbiorników energii

elektrycznej przed skutkami zasilania napięciem o zaniżonej jakości, okrętowe towarzystwa klasyfikacyjne wprowadziły odpowiednie przepisy. Należy podkreślić, że traktują one każde zaburzenie jakości napięcia osobno, ograniczając jego dopuszczalny poziom i całkowicie pomijając ewentualną synergię zaburzeń. Zestawienie dopuszczalnych parametrów napięcia wg przepisów wybranych towarzystw klasyfikacyjnych zamieszczono w Tab. 1 [8].

Wieloletnie badania prowadzone w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni wykazują, że obecne przepisy nie zapewniają zadowalającej ochrony silników indukcyjnych przed skutkami zasilania napięciem o zaniżonej jakości [6-12]. Silniki są narażone na przegrzanie nawet wówczas, jeśli parametry napięcia zasilającego spełniają wymagania przepisów okrętowych towarzystw klasyfikacyjnych. Przykładowo, w pracy [9] odnotowano wzrost temperatury uzwojeń o ok. 60 K dla przypadku

jednoczesnego wystąpienia wyższych harmonicznych napięcia (w przybliżeniu odpowiadających rzeczywistemu przebiegowi zarejestrowanemu na statku) oraz odchylenia częstotliwości i wartości skutecznej napięcia w granicach dopuszczalnych przepisami towarzystw klasyfikacyjnych.

Zapewnienie skutecznej ochrony morskich silników indukcyjnych przed skutkami zasilania napięciem o zaniżonej jakości wymaga opracowania nowych metod oceny jakości napięcia oraz modyfikacji przepisów okrętowych towarzystw klasyfikacyjnych.

Tabela 1. Zestawienie wskaźników dotyczących jakości napięcia zasilania według przepisów wybranych towarzystw klasyfikacyjnych – Polskiego Rejestru Statków (PRS), *Lloyd's Register of Shipping* (Lloyd), *Det Norske Veritas* (DNV) i *American Bureau of Shipping* (ABS)

Wskaźniki	PRS	LLOYD	DNV	ABS
THD [%]	10*	8	5** (10*)**	5**
pojedyncza harmoniczna [%]	–	–	–	3
współczynnik odchylenia wartości chwilowej od pierwszej harmonicznej [%]	30	–	–	–
tolerancja napięcia (ciągła) [%]	+6, –10	+6, –10	+6, –10	+6, –10
tolerancja częstotliwości (ciągła) [%]	±5	±5	±5	±5 (±5,5***)
krótkotrwałe odchylenia napięcia (do 1,5 s) [%]	±20	±20 –15	±20 –15	±20
krótkotrwałe odchylenia częstotliwości (do 5 s) [%]	±10	±10	±10	±10 (11***)

* – dla systemów z przekształtnikami energoelektronicznymi,

** – można dopuścić wyższe wartości THD i pojedynczych harmonicznych, jeśli odbiorniki i system rozdziału energii są przystosowane do pracy z nimi,

*** – dla prądnic wałowych pracujących ze zmienną prędkością obrotową, zależną od prędkości obrotowej silnika lub wału.

2. Nowa metoda oceny jakości napięcia

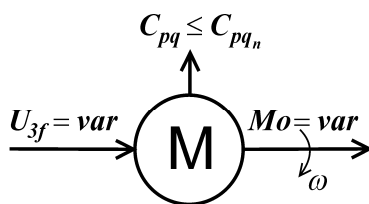
W ramach prac badawczych prowadzonych w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni przewiduje się opracowanie i weryfikację eksperymentalną nowej metody oceny jakości zasilania w sieciach okrętowych. Nowum proponowanej metody polega na uwzględnieniu zmiennego czasu trwania i wartości zaburzeń oraz synergii ich oddziaływania. Opracowanie nowej metody oparte będzie na ocenie obciążeń

cieplnych silników indukcyjnych, w warunkach zmiennego czasu trwania i wartości zaburzeń jakości napięcia. Silniki indukcyjne wybrano jako najbardziej reprezentatywny rodzaj odbiornika instalowanego w okrętowych systemach elektroenergetycznych. Należy podkreślić, że silniki indukcyjne są uważane za odbiornik szczególnie wrażliwy na zaburzenia jakości napięcia zasilania [1-15].

Weryfikacja eksperymentalna nowej metody będzie oparta nie tylko na kryterium maksymalnego, dodatkowego przyrostu

temperatury uzwojeń, ale również na ocenie średniej szybkości starzenia cieplnego układu izolacyjnego badanych odbiorników energii elektrycznej. Narzędziami matematycznymi do sprawdzenia zaproponowanych kryteriów będą modele nagrzewania silnika indukcyjnego zasilanego napięciem o zaniżonej jakości, modele starzenia cieplnego izolacji oraz syntetyczny wskaźnik jakości energii elektrycznej c_{pq} [8,10,11] opracowany i zaimplementowany w pracach zespołu badawczego Katedry Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni. Wskaźnik c_{pq} jest miarą dodatkowego przyrostu temperatury uzwojeń rozpatrywanego silnika w stanie równowagi cieplnej, w warunkach występowania wielu zaburzeń jednocześnie. Wartość wskaźnika równa 1 oznacza przyrost temperatury dla normalnych warunków zasilania i obciążenia silnika. Wartość wskaźnika c_{pq} jest wyznaczana dla najbardziej niekorzystnego przypadku, w zależności od właściwości silnika i od rodzaju jego obciążenia (np. obciążenie o charakterystyce wentylatorowej) oraz charakteru zaburzeń. Wskaźnik ten umożliwia oszacowanie obciążeń cieplnych silników szczególnie wrażliwych na występujące w rozważanym systemie długotrwałe zaburzenia jakości energii elektrycznej, co ilustruje rys. 1.

Należy nadmienić, że opis matematyczny temperaturowego współczynnika jakości energii elektrycznej wymaga uzupełnienia. Mianowicie, obecnie uwzględnia on następujące zaburzenia: odchylenia napięcia, odchylenia częstotliwości, asymetrię napięcia oraz wyższe harmoniczne. W rzeczywistości, w niektórych systemach elektroenergetycznych mogą występować subharmoniczne i interharmoniczne napięcia oraz związane z nimi wahania napięcia [2,15]. Skutkiem występowania rozważanych zaburzeń może być znaczący wzrost obciążeń cieplnych silnika

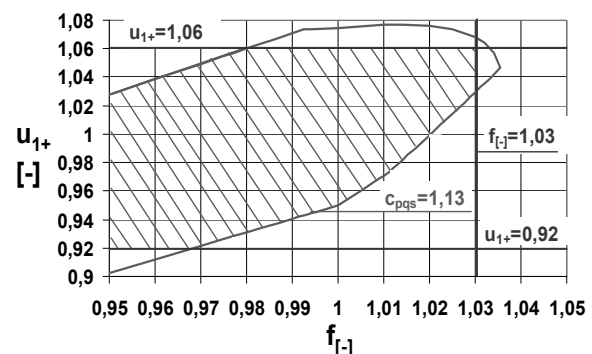


Rys. 1. Koncepcja wykorzystania temperaturowego współczynnika jakości energii elektrycznej do celów oceny obciążeń cieplnych silników indukcyjnych

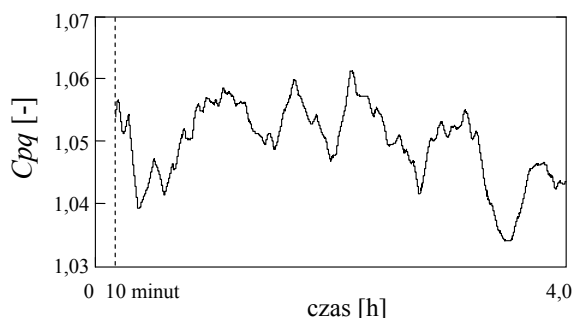
indukcyjnego [12].

W pracach [8,11] w oparciu o wymagania dotyczące maszyn elektrycznych [8], obecnie obowiązujące przepisy dotyczące jakości energii elektrycznej oraz akceptowalne skrócenie czasu życia silnika określono długotrwałe dopuszczalne wartości współczynnika c_{pq} w okrętowych systemach elektroenergetycznych. Ponadto, wyznaczono dopuszczalne poziomy różnych zaburzeń jakości energii elektrycznej. Na rys. 2 (na podstawie [8,11]) przedstawiono długotrwałe dopuszczalne kombinacje częstotliwości i wartości składowej współbieżnej napięcia. Wykresy sporządzono dla przypadku symetrycznego i sinusoidalnego przebiegu napięcia.

Dopuszczalne wartości współczynnika c_{pq} wyznaczono dla stałych w czasie parametrów zaburzeń, natomiast wstępne wyniki badań przeprowadzone w warunkach rzeczywistych, wskazują na ich istotną zmienność w czasie, i w konsekwencji zmienność wartości współczynnika c_{pq} , co ilustruje rys. 3 [8]. Stąd też, w warunkach zmiennego czasu trwania i wartości zaburzeń napięcia, obciążenia cieplne silników mogą odbiegać od poziomu określonego wartością współczynnika c_{pq} . Istnieje zatem konieczność oceny obciążeń cieplnych silników w stanach termicznie nieustalonych. Istotą proponowanego podejścia będą badania funkcjonału zdefiniowanego na zbiorze funkcji całkowalnych $f(z,s,T_0)$ określanych w danym przedziale czasu, gdzie z jest zbiorem zmiennych opisujących zaburzenia



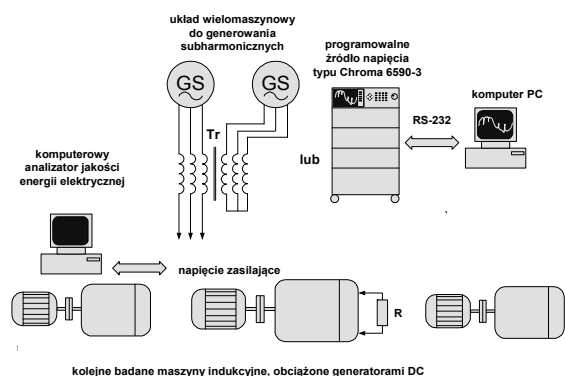
Rys. 2. Długotrwałe dopuszczalne kombinacje znormalizowanej częstotliwości i wartości składowej współbieżnej napięcia (odniesione do wartości znamionowej). Wykresy sporządzono dla przypadku symetrycznego i sinusoidalnego przebiegu napięcia.



Rys. 3. Wyniki pomiarów temperaturowego wskaźnika jakości energii elektrycznej na statku Horyzont II (wartości agregowane dla czasu 10 minut z uaktualnieniem dla każdego okna pomiarowego, czyli co ok. 200 ms).

jakości napięcia, s zbiorem zmiennych opisujących parametry rozważanych silników, a T_o zmienną wartości temperatury otoczenia. Funkcjonały $f(z,s,T_o)$ powinny odpowiadać średniej szybkości starzenia cieplnego układów izolacyjnych rozpatrywanych silników w warunkach występowania zmiennych zaburzeń i zmiennej temperatury otoczenia. Sposób uwzględnienia zmian temperatury otoczenia zostanie szczegółowo rozważony w czasie realizacji projektu badawczego. Badania różnych funkcjonałów zależnych od (z,s,T_o) powinny umożliwić znalezienie algorytmu określającego granice dopuszczalnej jakości napięcia zasilającego w warunkach zmiennego czasu trwania i wartości zaburzeń.

Zaproponowany algorytm zostanie zweryfikowany eksperymentalnie z wykorzystaniem stanowiska pomiarowego przedstawionego na rys. 4 [8]. W jego skład wchodzi trzy silniki indukcyjne z



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego do weryfikacji eksperymentalnej nowej metody oceny jakości napięcia.

wbudowanymi termoparami, obciążone generatorami DC, programowalne źródło napięcia typu Chroma 6590-3, oraz układ wielomaszynowy do generowania subharmonicznych. Szczegółowy opis stanowiska pomiarowego przedstawiono w pracy [8].

3. Podsumowanie

Na podstawie realizacji przedstawionych zadań badawczych przewidziano określenie kierunków dalszych badań nad odpowiednimi metodami i algorytmami pomiarowymi, pod kątem rekomendacji przyszłych rozwiązań aparaturowych i legislacyjnych dedykowanych analizie i pomiarom parametrów jakości energii elektrycznej. Sformułowane propozycje powinny być odniesione do możliwie prostego i niezawodnego instrumentarium pomiarowego, z uwzględnieniem odpowiednich dla tej klasy systemów elektroenergetycznych metod przetwarzania sygnałów oraz wymagań krajowych i międzynarodowych podmiotów odpowiedzialnych za standardy w obszarze jakości energii elektrycznej.

4. Literatura

- [1]. Apsley, J.M.: *Derating of multiphase induction machines due to supply imbalance*, Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.46, no.2, pp.798,805, March-April 2010
- [2]. Barros J., de Apraiz M., Diego R.I.: *Measurement of subharmonics in power voltages*, Proc. of 2007 IEEE Power Tech, Lausanne, Switzerland, 1-5 July 2007, pp. 1736-1740.
- [3]. Duarte, S.X.; Kagan, N.: *A power-quality index to assess the impact of voltage harmonic distortions and unbalance to three-phase induction motors*, Power Delivery, IEEE Transactions on, vol.25, no.3, pp.1846,1854, July 2010
- [4]. De Abreu J.P.G., Emanuel A.E.: *Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated costs*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, January/February 2002, pp. 12-20.
- [5]. Ferreira, F.; De Almeida, A.T.; Carvalho, J.; Cistelecan, M.V.: *Experiments to observe the impact of power quality and voltage-source inverters on the temperature of three-phase cage induction motors using an infra-red camera*, Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE

International , vol., no., pp.1311,1318, 3-6 May 2009

[6]. Gnaciński P.: *Effect of unbalanced voltage on windings temperature, operational life and load carrying capacity of induction machine*, Energy Conversion and Management (ELSEVIER), vol. 49, no. 4, April 2008, pp. 761-770

[7]. Gnaciński P.: *Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over or undervoltages*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, June 2008, pp. 363-371.

[8]. Gnaciński P.: *Wybrane zagadnienia oceny wpływu jakości energii elektrycznej na obciążenia cieplne silników indukcyjnych klatkowych małych mocy*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2009.

[9]. Gnaciński P., Mindykowski J., Tarasiuk T.: *A new concept of the power quality temperature factor and its experimental verification*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 57, no. 8, August 2008, pp. 1651-1660.

[10]. Gnaciński P.: *Effect of power quality on windings temperature of marine induction motors. Part I. Machine model*, Energy Conversion and Management (ELSEVIER), vol. 50, no. 10, October 2009, pp. 2463-2476.

[11]. Gnaciński P., Mindykowski J., Tarasiuk T.: *Effect of power quality on windings temperature of marine induction motors. Part II. Results of investigations and recommendations for related regulations*, Energy Conversion and Management (ELSEVIER), vol. 50, no. 10, October, pp. 2477-2485.

[12]. Gnaciński P., Pepliński M., Szweuda M.: *The effect of subharmonics on induction machine heating* Proc. of 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008, Poznań, 1-3 września 2008, pp. 826-829.

[13]. Mendes, A. M S; Quispe, E.C.; Fernández, X.M.L.; Cardoso, A.J.M.: *Influence of the positive sequence voltage on the temperature of three-phase induction motors*, XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM 2010), vol., no., pp.1,6, 6-8 Sept. 2010

[14]. Pillay P., Manyage M.: *Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies*, IEEE Transaction on Energy Conversion vol. 42, Dec. 2006, pp. 813-822

[15]. Tennakoon S., Perera S., Robinson D.: *Flicker attenuation—Part I: Response of three-phase induction motors to regular voltage fluctuations*,

IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 2, pp.1207 – 1214k, April 2008.

Autorzy

dr hab. inż. Piotr Gnaciński, prof. nadzw. AM,
e-mail: p.gnacinski@we.am.gdynia.pl

prof.dr hab. inż. Janusz Mindykowski, e-mail:
janmind@am.gdynia.pl

dr hab. inż. Tomasz Tarasiuk, prof. nadzw. AM,
e-mail: totar@am.gdynia.pl

mgr inż. Marcin Pepliński,
e-mail: marcinpe@am.gdynia.pl

Akademia Morska w Gdyni,
Katedra Elektroenergetyki Okrętowej
ul. Morska 83, 81-225 Gdynia

Recenzent

prof. dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski

