

WSKAŹNIKI JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ I ICH POMIAR W ELEKTROENERGETYCZNEJ SIECI OKRĘTOWEJ

Quality Factors of Electrical Energy and their Measurement in Ship Power Engineering System

Janusz MINDYKOWSKI, Tomasz TARASIUK

Wyższa Szkoła Morska w Gdyni

Streszczenie: W artykule podano podstawowe informacje, dotyczące wskaźników jakości energii elektrycznej, stosowanych w energetyce lądowej. Biorąc pod uwagę specyfikę elektroenergetycznych systemów okrętowych, zaproponowano i zdefiniowano odnośne wskaźniki jakości wytwarzanej i użytkowanej w tych systemach energii, które opisują zniekształcenia krzywych napięcia i prądu, statyczne i dynamiczne odchylenia napięcia i częstotliwości od ich wartości znamionowych, asymetrię napięć międzyfazowych oraz rozkład obciążeń między równolegle pracujące zespoły prądotwórcze. Następnie, biorąc pod uwagę stan obecny, przedstawiono główne przesłanki dotyczące konieczności wprowadzenia stosownych zmian w zakresie badania wskaźników jakości energii elektrycznej na statkach. Omówiono metodykę wyznaczania wybranych wskaźników i zaprezentowano wstępne wyniki odnośnych badań symulacyjnych. Przedstawiono również propozycje prostych rozwiązań układów do oceny współczynnika zniekształceń napięcia na szynach głównych elektrowni okrętowej. W sformułowanych wnioskach końcowych zwrócono uwagę, iż określenie optymalnych wartości wskaźników jakości energii elektrycznej powinno być dokonane przede wszystkim ze względu na bezpieczeństwo statku, przy uwzględnieniu ekonomicznych aspektów eksploatacji elektroenergetycznego systemu okrętowego.

Summary: This paper presents basic information concerning the quality factors of electrical energy applied in landing power engineering systems. Taking into consideration the specifics of ship power engineering systems, related quality factors of produced and utilised electrical energy have been defined and proposed. These factors describe distortions of current and voltage curves, static and dynamic deviations of voltage and frequency from their nominal values, asymmetry of phase-to-phase voltages, and load distribution between generating sets working in parallel. Afterwards, the need to introduce appropriate changes in the investigation of electrical power quality factors on ships is justified, based on the present state of affairs. The methodology of determining the chosen factors is described and the respective results of introductory simulation research are presented. In addition proposals of simple solutions to evaluate the voltage distortion coefficient on the main bus bars of a ship power station are presented and discussed. The final conclusions emphasize that estimation of optimal values of electrical power quality factors should be carried out, first, and foremost, for reasons of safety, and secondly considering the operation costs of a ship power engineering system.

1. WPROWADZENIE

Zapewnienie stabilnej i efektywnej pracy wszystkich elementów systemu elektroenergetycznego wymaga odpowiedniej jakości energii elektrycznej wytwarzanej, przesyłanej i użytkowanej w tym systemie. Powoduje to konieczność opisu parametrów energii za pomocą dostępnych pomiarowo i nośnych informacyjnie wskaźników, charakteryzujących jej jakość. Definiują one dopuszczalne

odchylenia wartości podstawowych wielkości opisujących energię elektryczną od ich wartości normatywnych. Elektroenergetyczna sieć okrętowa jest miejscem szczególnie narażonym na różnego rodzaju zakłócenia, powodujące odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowych, a także zniekształcenia przebiegów czasowych napięć i prądów występujących w tej sieci. Przyczyną występowania tych zakłóceń jest znaczna zmienność obciążenia, przy niespotykanym w energetyce lądowej, nie-

korzystnym stosunku mocy znamionowych pojedynczych odbiorników do mocy źródeł energii elektrycznej, a także coraz większa liczba przekształtników półprzewodnikowych zainstalowanych w okrętowym systemie elektroenergetycznym. Zagadnienia te bliżej omówiono w pracy [8]. Ze względu na wagę problemu, zwłaszcza w odniesieniu do bezpieczeństwa pracy systemów okrętowych, niektóre jego aspekty znajdują swoje odzwierciedlenie w opierających się w dużym stopniu na doświadczeniach eksploatacyjnych Przepisach Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich Polskiego Rejestru Statków [13]. Akty normatywne ujmują jednak problem jedynie fragmentarycznie, nie uwzględniając wielu istotnych czynników wpływających na poprawną pracę systemów okrętowych, a wynikających z właściwej jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej. W związku z powyższym, celem pracy jest kompleksowy dobór wskaźników jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach okrętowych oraz przedstawienie propozycji metod pomiarów wybranych wskaźników.

2. WSKAŹNIKI JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ STOSOWANE W ENERGETYCE LĄDOWEJ

Powszechnie przyjmuje się, że warunkiem właściwej jakości energii elektrycznej przy zasilaniu odbiorników z sieci wielofazowego prądu przemiennego jest sinusoidalne, symetryczne napięcie o odpowiedniej i stałej wartości skutecznej oraz częstotliwości [4]. W rzeczywistości w całej sieci elektroenergetycznej lub w niektórych jej elementach występują mniejsze lub większe odchylenia wyżej sformułowanych wymagań od warunków idealnych. Są one związane z pojawieniem się asymetrii i odkształceń przebiegów czasowych napięć i prądów, wahaniami ich wartości skutecznych i częstotliwości, brakiem ciągłości zasilania, pojawieniem się szumów i przebiegów przejściowych, a także przepływem prądu biernego [2]. Przyczyna tych zakłóceń leży w niedostatecznej jakości zasilania oraz obciążenia w systemie elektroenergetycznym. Na podkreślenie zasługuje fakt, że jakości zasilania i obciążenia nie można rozpatrywać niezależnie; każde pogorszenie się jakości obciążenia obniża jakość zasilania i odwrotnie. Reasumując, o jakości energii elektrycznej decydują właściwości jej parametrów, tj. napięcia, prądu i mocy.

Spotykane w literaturze wskaźniki jakości energii można podzielić na kilka grup. Należą do nich: współczynniki charakteryzujące kształt przebiegów czasowych prądów i napięć, współczynniki charakteryzujące wahania i odchylenia napięcia i częstotliwości od ich wartości znamionowych, współczynniki określające odkształcenia mocy oraz współczynniki opisujące asymetrię napięć i prądów.

2.1. Wskaźniki kształtu krzywej

Wskaźnikiem charakteryzującym kształt przebiegów czasowych napięć i prądów jest przede wszystkim współ-

czynnik zniekształceń, czasami określane jako współczynnik niesinusoidalności lub współczynnik zawartości harmonicznych, [4, 6]:

$$k_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} A_h^2}}{A_c} \quad (1)$$

gdzie:

- k_u — współczynnik zniekształceń,
 - A_h — wartość skuteczna h-tej harmonicznej,
 - A_c — wartość skuteczna przebiegu,
- lub w jednostkach względnych procentowych:

$$K_u = k_u \cdot 100\% \quad (1a)$$

Wskaźnikiem, również odnoszącym się do kształtu przebiegów czasowych prądu i napięcia jest współczynnik udziału poszczególnych wyższych harmonicznych k_{ih} w krzywej prądu, definiowany jako stosunek h-tej harmonicznej do pierwszej (podstawowej) harmonicznej [4]:

$$k_{ih} = \frac{I_h}{I_1} \quad (2)$$

Inne należące do tej grupy wskaźniki to współczynniki: kształtu, szczytu, odkształcenia i załamania napięcia [6].

2.2. Wskaźniki zmian wartości napięcia i częstotliwości

Wskaźniki charakteryzujące odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowych określają różnicę pomiędzy ich wartościami na zaciskach odbiornika a wartościami znamionowymi tych wielkości. Odchylenie napięcia można przedstawić w postaci [6]¹:

$$\Delta U = U - U_n \quad (3)$$

gdzie:

- U — napięcie na zaciskach odbiornika,
 - U_n — wartość znamionowa napięcia,
- lub w jednostkach względnych procentowych:

$$\delta U = \frac{U - U_n}{U_n} \cdot 100\% \quad (3a)$$

Analogicznie, dla częstotliwości można zapisać [6]:

$$\Delta f = f - f_n \quad (4)$$

gdzie:

- f — częstotliwość na zaciskach odbiornika,
 - f_n — wartość znamionowa częstotliwości,
- lub w jednostkach względnych procentowych:

¹ Zastosowano oznaczenia zgodne ze standardami przyjętymi w miernictwie elektrycznym

$$\delta f = \frac{\Delta f}{f_n} \cdot 100\% \quad (4a)$$

Wahania napięcia, występujące w sieci elektroenergetycznej mogą być określane amplitudą ΔU^* zmian napięcia lub zbiorem amplitud wahań i cechami charakteryzującymi ten zbiór, a także częstotliwością amplitud wahań napięcia f_v [6]:

$$\Delta U^* = U_{eks1} - U_{eks2} \quad (5)$$

lub w jednostkach względnych procentowych:

$$\delta U^* = \frac{\Delta U^*}{U_n} \cdot 100\% \quad (5a)$$

w których U_{eks1} , U_{eks2} to sąsiednie ekstremalne wartości skuteczne napięcia, zmieniającego się w czasie ze względnie dużą szybkością, np. większą od 1% na sekundę. Częstość wahań napięcia definiowana jest jako stosunek liczby amplitud m_v wahań napięcia do czasu T_v , w którym te wahania wystąpiły [6]:

$$f_v = \frac{m_v}{T_v} \quad (6)$$

Wahania napięcia w czasie ich występowania T_v charakteryzują się również energetyczną dawką wahań napięcia, określoną zależnością [6]:

$$D_v = \int_0^{T_v} \delta U^* dt \quad (7)$$

Podobnie definiowane są wahania częstotliwości, które można określić amplitudą Δf^* lub zbiorem amplitud wahań oraz częstością f_f występowania tych amplitud [6]:

$$\Delta f^* = f_{eks1} - f_{eks2} \quad (8)$$

lub w jednostkach względnych procentowych:

$$\delta f^* = \frac{\Delta f^*}{f_n} \cdot 100\% \quad (8a)$$

w których f_{eks1} , f_{eks2} to sąsiednie ekstremalne wartości częstotliwości zmieniającej się ze stosunkowo dużą szybkością, np. 0,2 Hz na sekundę. Częstość amplitud wahań częstotliwości jest definiowana jako stosunek liczby m_f amplitud wahań częstotliwości do czasu T_f , w którym te wahania występują [6]:

$$f_f = \frac{m_f}{T_f} \quad (9)$$

Do tej grupy wskaźników można również zaliczyć wskaźniki charakteryzujące zapady i impulsy napięcia. Zapady napięcia, czyli znaczne obniżenia skutecznej wartości napięcia, po których napięcie wraca do początkowej lub bliskiej jej wartości, po czasie od kilku okresów do dziesiątek sekund, można opisać [4]:

— głębokością zapadów δU_z^* :

$$\delta U_z^* = \frac{U_{\min} - U_n}{U_n} \cdot 100\% \quad (10)$$

w którym U_{\min} oznacza minimalną skuteczną wartość napięcia w czasie trwania zapadu;

— czasem trwania zapadów Δt_z .

Impulsy napięcia, czyli nagłe podskoki chwilowej wartości napięcia, po których następuje powrót napięcia do wartości początkowej lub jej bliskiej, w czasie od kilku mikrosekund do kilkudziesięciu milisekund, można opisać za pomocą [4]:

— napięcia impulsowego, czyli maksymalnej wartości chwilowej impulsu napięcia,

— amplitudy impulsu napięcia, czyli różnicy pomiędzy napięciem impulsowym i chwilową wartością napięcia podstawowej częstotliwości, odpowiadającą chwili początku impulsu napięcia,

— czasem trwania impulsu napięcia.

2.3 Wskaźniki odkształceń mocy

Wskaźnikami charakteryzującymi odkształcenia mocy [4, 6] są przede wszystkim: współczynnik odkształcenia mocy czynnej W_p , definiowany jako stosunek mocy czynnej wyższych harmonicznych P_h do mocy czynnej pierwszej (podstawowej) harmonicznej P_1 [6]:

$$W_p = \frac{P_h}{P_1} = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_h)}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1)} \quad (11)$$

oraz współczynnik odkształcenia mocy biernej W_q , definiowany jako stosunek mocy odkształcenia Q_d , zależnej od mocy biernej wyższych harmonicznych i mocy deformacji, do mocy biernej pierwszej harmonicznej Q_1 [6]:

$$W_q = \frac{Q_d}{Q_1} \quad (12)$$

a także współczynnik odkształcenia mocy pozornej W_s , definiowany jako stosunek mocy pozornej wyższych harmonicznych S_h do mocy pozornej pierwszej (podstawowej) harmonicznej S_1 [6]:

$$W_s = \frac{S_h}{S_1} \quad (13)$$

Inne spotykane w literaturze wskaźniki, np. współczynnik wykorzystania mocy wejściowej, współczynnik wykorzystania mocy zmagazynowanej w układzie, czy współczynnik charakteryzujący oscylacje mocy [6], w mniejszym stopniu informują o odkształceniu mocy, ale dają obraz jej przepływu w układzie elektroenergetycznym [6].

2.4. Wskaźniki asymetrii napięć i prądów

Wskaźnikami asymetrii napięć i prądów kolejności przeciwniej α_2 i zerowej α_0 [4] są:

$$\alpha_2 = \frac{A_2}{A_1} \quad (14)$$

lub procentowo:

$$\alpha_2^* = \alpha_2 \cdot 100\% \quad (14a)$$

oraz:

$$\alpha_0 = \frac{A_0}{A_1} \quad (15)$$

lub procentowo:

$$\alpha_0^* = \alpha_0 \cdot 100\% \quad (15a)$$

gdzie:

A_0, A_1, A_2 — wartości modułów składowych symetrycznych, odpowiednio zerowej, zgodnej i przeciwnej, trójfazowego układu napięć fazowych lub napięć międzyprzewodowych (wówczas $\alpha_0=0$) i prądów przewodowych.

Innym wskaźnikiem należącym do tej grupy wskaźników jest współczynnik niesymetrii napięciowej w_n określony jako stosunek największej odchyłki napięcia Δu od średniej wartości napięcia $U_{\dot{s}r}$ do średniej wartości napięcia [3]:

$$w_n = \frac{\Delta u}{U_{\dot{s}r}} \quad (16)$$

Zgodnie z ustaleniami Międzynarodowej Komisji Elektrotechniki (IEC Report 892/1987), jeżeli niesymetria napięciowa przekracza 5%, należy przeanalizować pracę silnika elektrycznego z uwzględnieniem składowej symetrycznej napięcia kolejności przeciwnej. Przy mniejszych niesymetriach napięciowych, należy ograniczyć jego obciążenie w stopniu zależnym od tej niesymetrii [3].

3. PROPOZYCJE WSKAŹNIKÓW JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ W ELEKTROENERGETYCZNEJ SIECI OKRĘTOWEJ

Złożoność pojęcia jakości energii elektrycznej, wyrażająca się znaczną liczbą opisujących ją różnorodnych wskaźników spotykanych w literaturze oraz niemożnością sprowadzenia różnych jej cech do jednego syntetycznego wskaźnika, a przede wszystkim specyfika okrętowych sieci elektroenergetycznych [8], skłaniają do doboru i zdefiniowania na podstawie przyjętych kryteriów stosowanych wielkości dla potrzeb elektrotechniki okrętowej. Za podstawowe kryterium tego doboru uznano przede wszystkim bezpieczeństwo pracy nawałgicznych systemów okrętowych, takich jak: nawigacyjny, napędowy,

czy radiokomunikacyjny, co również znajduje swoje odzwierciedlenie w odnośnych przepisach towarzystw klasyfikacyjnych. Nadto, należy uwzględnić aspekt ekonomiczny rozpatrywanego zagadnienia oraz łatwość wykorzystania wybranych wskaźników w procesie diagnozowania stanów awaryjnych elektroenergetycznego systemu okrętowego.

Elektroenergetyczne systemy okrętowe, pomimo istnienia wielu podobieństw dla różnych rozwiązań tych systemów, wykazują również wiele cech indywidualnych, wynikających zarówno z konkretnej konfiguracji elektrowni okrętowej, jak i stosowanych urządzeń odbiorczych [8]. Wprowadzanie nowych rozwiązań technicznych, mających na celu ekonomiczną eksploatację systemów okrętowych, powoduje na ogół pogorszenie jakości energii elektrycznej w rozpatrywanych systemach. Oprócz tradycyjnie występujących w elektroenergetycznych systemach okrętowych znacznych odchyłań napięcia i częstotliwości od ich wartości znamionowych, pojawiają się istotne zniekształcenia przebiegów napięć i prądów. Dobór uniwersalnego zestawu wskaźników jakości energii elektrycznej dla potrzeb elektrotechniki okrętowej należy oprzeć na założeniu, że w rozpatrywanych systemach zostaną wykorzystane aktualne rozwiązania techniczne, związane z wytwarzaniem i użytkowaniem energii elektrycznej. Wybrane wskaźniki powinny w sposób jednoznaczny opisywać zniekształcenia krzywych napięcia i prądu, statyczne i dynamiczne odchylenia napięcia i częstotliwości od ich wartości znamionowych, asymetrię napięć fazowych oraz rozkład obciążeń między równoległe pracujące zespoły prądotwórcze.

3.1. Współczynniki charakteryzujące zniekształcenia przebiegów czasowych napięć i prądów

Jako wskaźniki zniekształceń przebiegów czasowych napięcia w elektroenergetycznych systemach okrętowych można przyjąć współczynnik zniekształceń K_u określony zależnością (1a) oraz współczynnik maksymalnego odchylenia chwilowej wartości napięcia od pierwszej harmonicznej u_w :

$$u_w = \frac{\Delta U_m}{\sqrt{2} \cdot U_1} \cdot 100\% \quad (17)$$

gdzie:

ΔU_m — wartość maksymalna odchylenia,
 U_1 — wartość skuteczna pierwszej harmonicznej napięcia.

Ze względu na dodatkowe straty energii powodowane wyższymi harmonicznymi prądu w maszynach elektrycznych, transformatorach, aparatach elektrycznych, czy też kondensatorach do poprawy współczynnika mocy, celowe jest wyznaczanie średniej wartości współczynnika zniekształceń napięcia K_u w stosunkowo długich okresach.

Ze względu na zakłócenia radioelektryczne, w warunkach okrętowych przenoszące się głównie przez sieć zasilającą [17], konieczne jest wyznaczanie współczynników zawartości harmonicznymi k_{ih} , określonych zależnością (2). Zależnie od przyjętej metody pomiaru, można wyznaczać całe widmo częstotliwościowe sygnału napięciowego i prądowego lub tylko współczynniki zawartości

wybranych kilku harmonicznych, w zależności od liczby i rodzaju urządzeń zainstalowanych w systemie. Przykładowo, dla systemów elektroenergetycznych z przekształtnikami energoelektronicznymi dominujące będą harmoniczne prądu zasilającego opisane zależnością [11]:

$$n = k \cdot p \pm 1 \quad (18)$$

gdzie:

- n — rząd harmonicznej,
- $k = 1, 2, 3, \dots$ — liczby naturalne,
- p — liczba pulsów przekształtnika.

Natomiast wartość skuteczną n -tej harmonicznej można wyznaczyć ze wzoru [11]:

$$I_n = \frac{1}{n} \cdot I_1 \quad (19)$$

Zniekształcony prąd zasilający przekształtniki powoduje zniekształcenia napięcia na szynach głównych elektrowni okrętowej. Praktycznie, największe znaczenie mają harmoniczne: piąta, siódma, jedenasta, trzynasta, siedemnasta, dziewiętnasta, dwudziesta trzecia i dwudziesta piąta [14].

3.2. Współczynniki charakteryzujące odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowych oraz asymetrię napięć międzyfazowych

Wskaźnikami charakteryzującymi statyczne i dynamiczne odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowych w elektroenergetycznych sieciach okrętowych są: współczynnik odchylenia napięcia δU , określony zależnością (3a), i współczynnik odchylenia częstotliwości δf , określony zależnością (4a). Współczynniki odchylenia napięcia i częstotliwości od ich wartości znamionowych powinny być określane zarówno w stanach statycznych, jak i dynamicznych. W tym drugim przypadku istnieje konieczność wyznaczenia maksymalnych odchylenia dynamicznych z zależności:

$$\delta U_d = \frac{U_e - U_n}{U_n} \cdot 100\% \quad (20)$$

gdzie:

- U_n — napięcie znamionowe,
- U_e — wartość skuteczna największej zmiany napięcia w stanie przejściowym,
- δU_d — współczynnik dynamicznego odchylenia napięcia;

analogicznie, dla częstotliwości można zapisać:

$$\delta f_d = \frac{f_e - f_n}{f_n} \cdot 100\% \quad (21)$$

gdzie:

- f_n — częstotliwość znamionowa,
- f_e — największa zmiana częstotliwości w stanie przejściowym,
- δf_d — współczynnik dynamicznego odchylenia częstotliwości.

Nadto, należy określić czas trwania procesów przejściowych, który, przykładowo, dla zespołów prądowców o mocy 650 kVA wyposażonych w układy regulacji napięcia typu TUR i prędkości obrotowej typu Woodward UG8, może wynosić w przypadku napięcia do 1s i w przypadku częstotliwości do 4,45 s [5].

Wskaźnikiem asymetrii napięć może być współczynnik niesymetrii napięciowej w_n , określony zależnością (16). Dodatkowo należy rozważyć możliwość kontroli impulsów napięcia występujących w elektroenergetycznych sieciach okrętowych.

3.3. Współczynniki charakteryzujące rozptyły mocy czynnej i biernej między pracujące równolegle zespoły prądowców

Wskaźnikami nie spotykanymi w energetyce lądowej, mającymi istotny wpływ na ciągłość zasilania w elektroenergetycznym systemie okrętowym, a tym samym na bezpieczeństwo statku, są współczynniki rozptyłu mocy czynnej i biernej między równolegle pracujące zespoły prądowców. Współczynniki rozptyłu mocy czynnej i -tej prądnicy δP_i i mocy biernej i -tej prądnicy δQ_i , pracującej równolegle, można zdefiniować następująco:

$$\delta P_i = \frac{P_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^n P_{in}}{P_m} \cdot 100\% \quad (22)$$

$$\delta Q_i = \frac{Q_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^n Q_{in}}{Q_m} \cdot 100\% \quad (23)$$

gdzie:

- P_i, Q_i — obciążenie czynne (bierne) i -tej prądnicy,
- P_m, Q_m — znamionowe obciążenie czynne lub bierne prądnicy o największej mocy pracującej równolegle lub znamionowe obciążenie czynne lub bierne rozpatrywanej prądnicy, jeżeli jej znamionowe obciążenie czynne jest mniejsze niż 0,6, a bierne mniejsze niż 0,4 znamionowego obciążenia czynnego lub biernego prądnicy o największej mocy pracującej równolegle,
- n — liczba pracujących równolegle prądnic,
- α_i — współczynnik proporcjonalności zależny od liczby i mocy współpracujących zespołów prądowców ($\alpha_i = 0,5$ dla $n=2$ i równych mocy współpracujących zespołów).

Z powodu dużego znaczenia proporcjonalnego rozptyłu obciążeń czynnych i biernych między równolegle pracujące zespoły prądowców dla zapewnienia ciągłości zasilania w elektroenergetycznym systemie okrętowym, a tym samym dla bezpieczeństwa statku, współczynniki δP_i i δQ_i powinny być wyznaczone zarówno w stanach statycznych, jak i dynamicznych.

3.4. Wskaźniki dodatkowe

Ze względu na charakter elektroenergetycznych systemów okrętowych — sieci elastyczne oraz niezależność układów regulacji napięcia i prędkości obrotowej (częstotliwości) poszczególnych zespołów prądowców, w rozpatrywanych systemach pojawiają się znaczące odchylenia stosunku U/f od jego wartości znamionowej. Powoduje to istotne zmiany strumienia magnetycznego w transformatorach i maszynach elektrycznych. Wobec powyższego za zasadne należy uznać wprowadzenie współczynnika opisującego zmiany stosunku U/f wokół jego wartości znamionowej, który można określić mianem współczynnika odchylenia strumienia magnetycznego $\delta\Phi$:

$$\delta\Phi = \frac{U/f - U_n/f_n}{U_n/f_n} \cdot 100\% \quad (24)$$

Celowe wydaje się określanie współczynnika opisanego zależnością (24) w stosunkowo długich okresach uśredniania, z uwagi na jego wpływ na straty całkowite w urządzeniach zawierających obwody magnetyczne.

Dodatkowo, ze względów ekonomicznych, do opisu jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznych systemach okrętowych można wykorzystać współczynnik odkształcenia mocy czynnej W_p , określony zależnością (11), ze względu na decydujący wpływ na pracę odbiorników (np. silników elektrycznych) mocy wytwarzanej przez pierwsze harmoniczne napięcia i prądu [15].

3.5. Zestawienie wskaźników charakteryzujących jakość energii elektrycznej wytwarzanej i użytkowanej w elektroenergetycznej sieci okrętowej

Propozycje wskaźników jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach okrętowych i ich miar ilościowych wg przepisów Polskiego Rejestru Statków (PRS) zawarto w tablicy 1. Brak wartości granicznej określonej wielkości oznacza, że odnośny wskaźnik jakości energii elektrycznej nie został zdefiniowany w powyższych przepisach. Warto dodać, że instytucje klasyfi-

kacyjne innych państw przyjmują do oceny jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznych systemach okrętowych analogiczne jak PRS wskaźniki, a różnice dotyczą głównie ich dopuszczalnych wartości.

Przedstawione w tablicy 1 dopuszczalne statyczne i dynamiczne odchylenia napięcia i częstotliwości od ich wartości znamionowych oznaczają wartości minimalne konieczne do zapewnienia poprawnej pracy odbiorników, natomiast wymagania stawiane w tym zakresie zespołom prądowców mogą być większe.

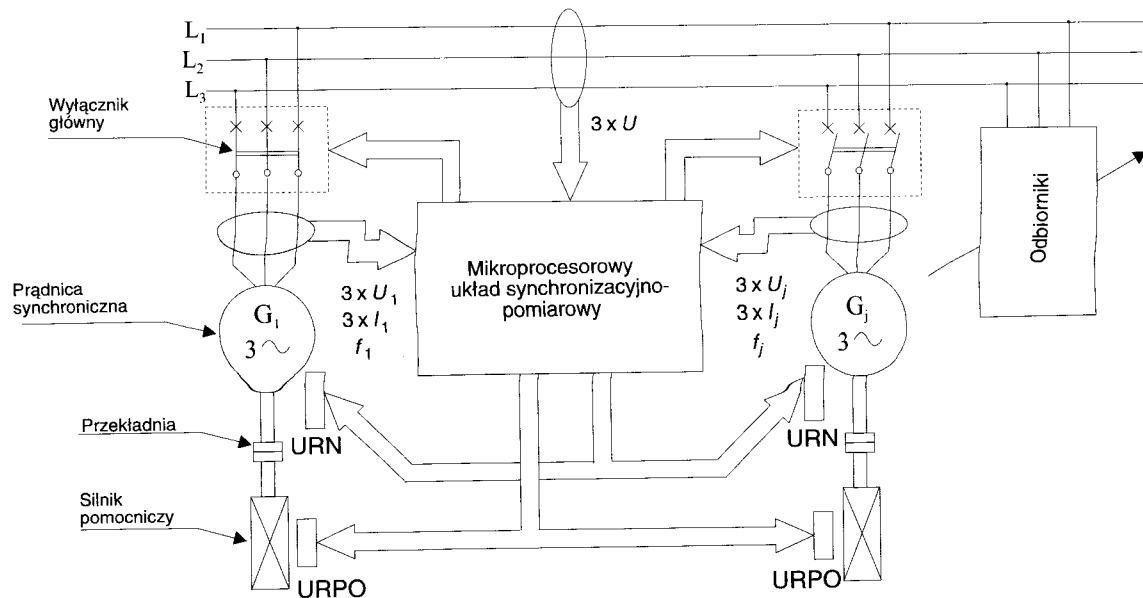
4. METODY BADANIA WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ W ELEKTROENERGETYCZNEJ SIECI OKRĘTOWEJ

4.1. Stan obecny i przesłanki wprowadzenia zmian

W chwili obecnej pomiary parametrów okrętowego systemu elektroenergetycznego dotyczą głównie napięcia i częstotliwości na szynach głównych oraz prądów i mocy poszczególnych zespołów prądowców [7]. Pomiaru te są często prowadzone z wykorzystaniem przyrządów podatnych na odkształcenia badanych przebiegów prądu i napięcia, co prowadzi do znacznych błędów. Stąd powszechne staje się wprowadzanie do praktyki pomiarów okrętowych przetworników rzeczywistej wartości skutecznej. Nadto, należy rozważyć możliwości zastąpienia stosowanych do pomiaru dużych prądów przekładników prądowych przez rezystancyjne boczniki współpracujące z elementami optoelektronicznymi lub transreaktory z rdzeniami wykonanymi z materiałów o małych stratnościach (magnetodielektryki). Warto podkreślić, że obecnie nie są kontrolowane zniekształcenia krzywych napięć i prądów; nie są również rejestrowane chwilowe odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowych, mimo uwzględnienia tych parametrów w przepisach PRS.

Tablica 1. Wskaźniki jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej i ich miary ilościowe wg PRS

Współczynnik	Graniczna wartość wg przepisów PRS
Współczynnik zniekształceń napięcia K_u	10%
Współczynnik odchylenia wartości chwilowej napięcia od pierwszej harmonicznej u_w	30%
Współczynniki zawartości poszczególnych harmonicznych k_{ih}	—
Współczynnik średniego zniekształcenia napięcia $K_{u\bar{s}r}$	—
Współczynnik statycznego odchylenia napięcia δU	+6% i -10%
Współczynnik statycznego odchylenia częstotliwości δf	± 5%
Współczynnik dynamicznego odchylenia napięcia δU_d	± 20% w czasie 1,5s
Współczynnik dynamicznego odchylenia częstotliwości δf_d	± 10% w czasie 5s
Współczynnik średniego odchylenia napięcia $\delta U_{\bar{s}r}$	—
Współczynnik średniego odchylenia częstotliwości $\delta f_{\bar{s}r}$	—
Współczynnik statycznego rozplywu obciążenia czynnego δP_i	15% lub 25%
Współczynnik statycznego rozplywu obciążenia biernego δQ_i	10% lub 25%
Współczynnik dynamicznego rozplywu obciążenia czynnego δP_{id}	—
Współczynnik dynamicznego rozplywu obciążenia biernego δQ_{id}	—
Współczynnik niesymetrii napięciowej w_n	—
Współczynnik średniego odchylenia strumienia magnetycznego $\delta\Phi_{\bar{s}r}$	—
Współczynnik odkształcenia mocy czynnej W_p	—



Rys. 1. Przykładowy schemat współpracy układu do kompleksowej oceny parametrów energii elektrycznej z elektroenergetyczną siecią okrętową: URN — układ regulacji napięcia, URPO — układ regulacji prędkości obrotowej

Pomiary wskaźników jakościowych w elektroenergetycznej sieci okrętowej powinny być prowadzone przede wszystkim na szynach głównych i w polach prądnic na szynach łączących prądnice z szynami głównymi. Brak jest natomiast ekonomicznego uzasadnienia prowadzenia tego typu pomiarów we wszystkich odcinkach sieci okrętowej. Badania wskaźników jakości energii elektrycznej w torach zasilających odbiorniki nieliniowe oraz urządzenia radiowe i nawigacyjne powinny być przeprowadzane okresowo i po każdym pogorszeniu się odnośnych wskaźników na szynach głównych. Przeprowadzenie badań okresowych wymagać będzie zastosowania przenośnej aparatury. Istnieją już proste przyrządy do tego rodzaju badań, np. cęgi do pomiaru rzeczywistej wartości skutecznej (true rms value) i zawartości harmonicznych m.in. firmy Chauvin Arnoux [12].

Pomiarów wybranych wskaźników jakości energii elektrycznej można dokonać wykorzystując techniki analogowe lub cyfrowe, w których jako kryterium podziału rozumie się sposób przeprowadzenia operacji matematycznych koniecznych do wyznaczenia szukanej wielkości. Jeżeli operacje matematyczne, związane z przetwarzaniem badanych sygnałów, są realizowane za pomocą techniki analogowej można mówić o analogowych metodach pomiaru. Natomiast w przypadku przetworzenia sygnałów na postać cyfrową już w stopniach wejściowych przyrządów i ich dalszego przetwarzania z wykorzystaniem metod numerycznych można mówić o cyfrowych metodach pomiaru [1].

Istnieje wiele analogowych metod pomiaru rzeczywistej wartości skutecznej napięcia i prądu oraz mocy w obwodach z przebiegami niesinusoidalnymi. Przetworniki pomiarowe tych wielkości składają się z członów funkcjonalnych, realizujących operacje matematyczne podnoszenia do kwadratu, całkowania, mnożenia, sumowania itp., konieczne do wyznaczenia szukanych wielkości. Szczegółowe opisy takich układów można znaleźć m.in. w pracach [1] i [16]. Wykorzystane we wspomnianych układach

bloki funkcjonalne dadzą się z łatwością zaadaptować do pomiaru niektórych wskaźników jakości energii elektrycznej zgodnie z ich definicją.

4.2. Metodyka określania wybranych wskaźników jakości energii elektrycznej

W paśmie częstotliwości występujących w elektroenergetycznych sieciach okrętowych zastosowanie technik analogowych jest utrudnione, przede wszystkim w związku z problemami w konstruowaniu filtrów wąskopasmowych o małych częstotliwościach środkowych oraz ze względu na duże stałe czasowe układów uśredniających [9]. Wydaje się, że w przyszłości decydujące znaczenie będą miały cyfrowe metody pomiaru. Wiąże się to ze stale postępującym rozwojem techniki mikroprocesorowej i obserwowaną tendencją spadkową cen układów mikroprocesorowych. Równie istotny jest rozwój algorytmów i stały wzrost prędkości działania tych układów, co umożliwi pomiar wybranych wielkości w czasie rzeczywistym. Uproszczony schemat elektrowni okrętowej, w której pomiar wszystkich parametrów systemu elektroenergetycznego, umożliwiających ocenę jakości energii elektrycznej w tym systemie oraz automatyzację pracy elektrowni, odbywa się poprzez próbkowanie napięć i prądów poszczególnych prądnic oraz próbkowanie napięć na szynach głównych i obróbkę numeryczną tych sygnałów przedstawiono na rysunku 1.

Wyznaczenie wskaźników jakości energii elektrycznej, za pomocą układu mikroprocesorowego, przedstawionego na rysunku 1, wymaga realizacji na drodze obliczeń numerycznych znanych zależności określających wartości skuteczne sygnałów, moc czynną oraz współczynniki szeregu Fouriera. Wartość skuteczną mierzonego sygnału można obliczyć korzystając z zależności:

$$A_c = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} a_k^2} \quad (25)$$

gdzie:

- A_c — wartość skuteczna sygnału,
- N — liczba próbek sygnału w jego okresie,
- a_k — k-ta próbka sygnału.

Analogicznie, moc czynną można wyznaczyć z zależności:

$$P = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} u_k \cdot i_k \quad (26)$$

gdzie:

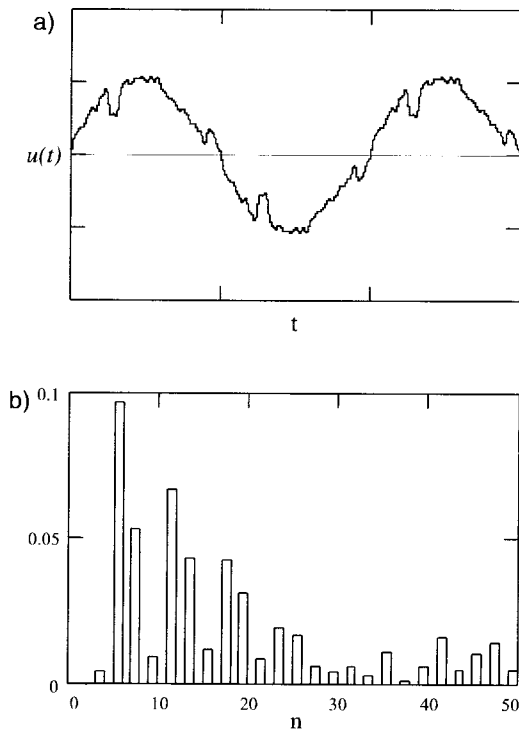
- P — moc czynna,
- u_k, i_k — k-te próbki napięcia i prądu;
- a amplitudę d_n n-tej harmonicznej ze wzoru:

$$d_n = \left| \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot \exp\left(\frac{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot k}{N}\right) \right| \quad (27)$$

Dzięki układowi przedstawionemu na rysunku 1, możliwe będzie wyznaczanie nie tylko wartości skutecznych sygnałów i współczynnika zniekształceń, ale także pozostałych wskaźników zawartych w tabelicy 1. Nadto, układ ten może realizować funkcje dotychczas stosowanych układów pomiarowych, automatycznego sterowania elektrownią okrętową oraz zabezpieczeń, a jego rozbudowa może odbywać się na drodze programowej, bez ponoszenia dodatkowych nakładów.

4.3. Wstępne wyniki badań symulacyjnych

Opierając się na powyższych zależnościach przepro-

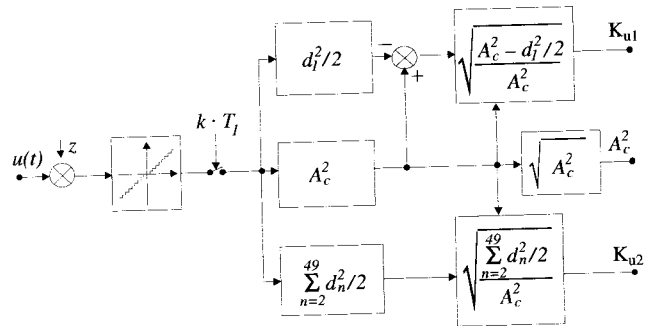


Rys. 2. Napięcie na szynach głównych elektrowni okrętowej z zainstalowanym sześciopulsowym przekształtnikiem energoelektronicznym:

- a) przebieg $u(t)$,
- b) dyskretne widmo amplitudowe sygnału $u(t)$ dla $n \geq 2$

wadzone wstępne badania symulacyjne, polegające na określeniu wartości skutecznej i współczynnika zniekształceń napięcia dla sygnału sinusoidalnego i sygnału przedstawionego na rysunku 2 [14], z uwzględnieniem programowo wprowadzonego kwantowania i losowych zakłóceń. Dodatkowo założono zmiany częstotliwości sygnałów w zakresie $\pm 10\%$ częstotliwości znamionowej oraz stałą częstotliwość próbkowania, co oznacza, że w jednym okresie sygnału próbkowanego może wystąpić niecałkowita liczba okresów sygnału próbkującego.

Współczynnik zniekształceń napięcia obliczono dla obu sygnałów dwoma metodami: wyznaczając wartość skuteczną sygnału i amplitudę podstawowej harmonicznej (metoda 1) oraz wartość skuteczną i amplitudy wyższych harmonicznych do 49 włącznie (metoda 2), co ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Wyznaczanie wartości skutecznej A_c sygnału $u(t)$ i współczynnika zniekształceń tego sygnału dwoma metodami: metoda 1- K_{u1} i metoda 2- K_{u2} ; oznaczenia takie, jak we wzorach (25), (26) i (27)

Przykładowe wyniki symulacji zestawiono w tabelicy 2.

W badaniach symulacyjnych zastosowano 12 bitowy przetwornik a/c, a przyjęty okres próbkowania był równy 100 μ s. Zakłócający sygnał losowy mógł przyjmować wartości w zakresie $\pm 1,21\%$ amplitudy podstawowej harmonicznej badanego sygnału, o częstotliwości zmieniającej się w zakresie 45...55 Hz. Nadto, w obliczeniach uwzględniono rzeczywisty okres sygnału badanego, określony poprzez zliczanie impulsów zegara o częstotliwości 10 MHz.

Tabela 2. Wyniki symulacji zrealizowanej na podstawie algorytmu przedstawionego na rysunku 3

Sygnał testowy	K_{u1} [%]	K_{u2} [%]	Błąd względny pomiaru A_c [%]
Sygnał sinusoidalny $K_u = 0\%$	0,95...1,03	0,68...0,72	0,27
Sygnał odkształcony z rysunku 2 $K_u = 15,08\%$	15,06...15,11	15,00...15,08	0,26

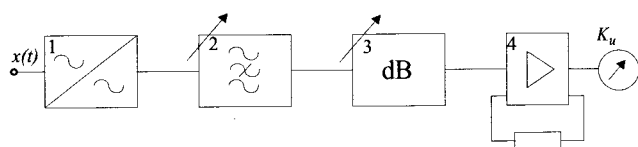
Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że druga z przedstawionych metod określania współczynnika zniekształceń jest korzystniejsza, ale wymaga wykonania dużej liczby operacji matematycznych, co ma istotne znaczenie w przypadku pomiarów sygnałów zawierających znaczną liczbę wyższych harmonicznych. Większe błędy w określaniu współczynnika zniekształceń napięcia dla sygnałów nie odkształconych za pomocą pierwszej, prostszej metody wynikają z charakteru opisującej ten współczynnik zależności (funkcja pierwiastkowa) i przyjętej procedury obliczeń, dla których błędy względne pomiaru rosną bardzo szybko, gdy wartości skuteczne sygnału i podstawowej harmonicznej dążą do tej samej wartości.

Stwierdzono również, że zwiększanie liczby bitów przetwornika a/c powyżej 12 nie prowadzi do znaczącej poprawy wyników pomiaru współczynnika zniekształceń. Istotne natomiast jest uwzględnienie w obliczeniach, zamiast liczby pobranych próbek, rzeczywistego okresu badanego sygnału (próbki ułamkowe).

4.4. Propozycje prostych rozwiązań układów do oceny współczynnika zniekształceń napięcia

W wielu przypadkach, ze względów ekonomicznych, niecelowe jest przeprowadzanie pomiarów wszystkich proponowanych wskaźników jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej.

Należy wówczas kontrolować pewien minimalny, niezbędny dla określonych celów, zestaw parametrów energii elektrycznej. Oprócz tradycyjnie kontrolowanych parametrów, takich jak napięcia, częstotliwość, prądy i moce, istnieje pilna potrzeba wprowadzenia wskaźnika charakteryzującego zniekształcenia krzywej napięcia na szynach głównych w elektroenergetycznej sieci okrętowej. Zniekształcenia napięcia w elektroenergetycznych sieciach okrętowych, określone za pomocą współczynnika K_u , często przekraczają 5%, a nawet mogą osiągać 20% [14]. Stosunkowo łatwy pomiar współczynnika K_u oraz znaczenie zniekształceń napięcia dla bezpiecznej i ekonomicznej eksploatacji systemów okrętowych przemawiają za obligatoryjnym przyjęciem tej wielkości do oceny jakości energii produkowanej na statkach. Zniekształcenia napięcia oprócz dodatkowych strat energetycznych i dodatkowych błędów przyrządów pomiarowych, które z reguły konstruowane są przy założeniu sinusoidalnych przebiegów mierzonych, powodują przypadkowe błędy w pracy urządzeń automatyki [14]. Występują one zwłaszcza w stanach dynamicznych zmian napięcia i czę-

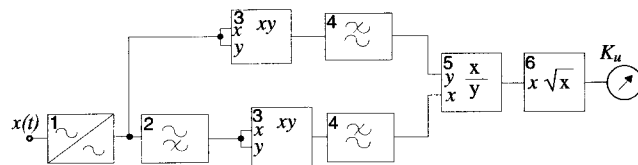


Rys. 4. Schemat blokowy miernika zniekształceń: 1 — układ wejściowy, 2 — filtr środkowo-zaporowy, 3 — tłumik, 4 — wzmacniacz z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

stotliwości, które nieodłącznie towarzyszą eksploatacji elektroenergetycznego systemu okrętowego.

W przypadku pomiaru tylko współczynnika zniekształceń, ze względów ekonomicznych celowe może być zastosowanie techniki analogowej. Istnieje wiele rozwiązań układów do pomiaru tego współczynnika, np. miernik zniekształceń przedstawiony na rysunku 4 [10].

Podstawowym elementem przedstawionego na rysunku 4 miernika zniekształceń jest regulowany filtr środkowo-zaporowy 2, który umożliwi eliminację podstawowej harmonicznej mierzonego sygnału. Jednak ze względu na jeden tor przetwarzania układ powyższy wymaga dostrojenia do bieżącej wielkości wartości skutecznej badanego sygnału. Wobec tego wydaje się, że ten sposób pomiaru nie znajdzie zastosowania w elektroenergetycznych sieciach okrętowych, ze względu na złożoność procedury pomiarowej oraz duże prawdopodobieństwo wystąpienia błędów, spowodowanych możliwymi zmianami wartości skutecznej badanego sygnału w trakcie przeprowadzania pomiaru. Natomiast stosunkowo prostym rozwiązaniem, umożliwiającym ciągły pomiar współczynnika zniekształceń, jest układ zrealizowany bezpośrednio na podstawie zależności (1), z wykorzystaniem typowych układów funkcjonalnych stosowanych w miernikach rzeczywistej wartości skutecznej, przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Przykładowy układ do pomiaru współczynnika zniekształceń napięcia na szynach głównych w elektroenergetycznej sieci okrętowej: 1 — układ wejściowy, 2 — filtr górnoprzepustowy, 3 — układ „kwadratujujący”, 4 — filtr dolnoprzepustowy, 5 — układ dzielący, 6 — układ pierwiastkujący

W powyższym układzie występują dwa torzy przetwarzania wielkości wejściowej. Jednym z nich jest typowy tor rzeczywistej wartości skutecznej sygnału, a drugim analogiczny tor rzeczywistej wartości skutecznej wyższych harmonicznych sygnału. Eliminacja podstawowej harmonicznej sygnału następuje w filtrze górnoprzepustowym. Parametry tego filtra powinny być dopasowane do częstotliwości podstawowej sieci, z uwzględnieniem możliwych zmian tej częstotliwości w zakresie $\pm 10\%$ częstotliwości nominalnej.

5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie w elektrotechnice okrętowej nowych rozwiązań technicznych, związanych z wytwarzaniem i użytkowaniem energii elektrycznej, spowodowało konieczność nowego spojrzenia na problem kompatybilności

elektromagnetycznej w środowisku okrętowym. W celu zapewnienia poprawnej pracy urządzeń elektrycznych, konieczne staje się stosowanie urządzeń odpornych na typowe zakłócenia jakości energii elektrycznej, występujące w elektroenergetycznych sieciach okrętowych, jak również poprawa jakości energii w całym systemie lub w jego wybranych częściach przez zastosowanie elementów przeciwwzakłóceńowych. Wymaga to jednak pomiarowego określenia poziomów czynników pogarszających jakość energii elektrycznej w elektroenergetycznych systemach okrętowych, a następnie bieżącej kontroli poprawności pracy systemu przez pomiar wybranych wskaźników jakości energii. Wydaje się, że w chwili obecnej, oprócz pomiarów napięcia, częstotliwości, mocy i jej rozptyłu między pracujące równolegle zespoły prądotwórcze, należy kontrolować zniekształcenia napięcia na szynach głównych w rozdzielnicy głównej, badając w sposób ciągły współczynnik K_u . Nadto, celowe staje się wyposażenie statków w przenośne urządzenia do pomiaru zniekształceń prądów w wybranych elementach elektroenergetycznego systemu okrętowego, które mogą być potencjalną przyczyną pogorszenia współczynnika K_u . O skali problemu świadczą przykładowe wyniki badań [14], w czasie których określono współczynnik zniekształceń napięcia K_u na szynach głównych, wynoszący 15,1%.

Określenie optymalnych wartości wskaźników jakości energii elektrycznej, zarówno ze względu na bezpieczeństwo, jak i ekonomiczną eksploatację elektroenergetycznego systemu okrętowego, powinno zostać przeprowadzone na podstawie znajomości wpływu zniżania określonych wskaźników na pracę odbiorników zainstalowanych w systemie. Dla każdego z wybranych wskaźników powinny zostać określone dwie wartości: nieprzekraczalna wartość minimalna, wynikająca z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa pracy systemów okrętowych, i wartość optymalna, będąca punktem równowagi między nakładami ponoszonymi na poprawę jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej a zyskami ekonomicznymi wynikającymi z poprawy tej jakości. Wartości te powinny być określane dla każdego elektroenergetycznego systemu okrętowego indywidualnie na etapie jego projektowania, dzięki znajomości odbiorników zainstalowanych w systemie, ich wymagań odnośnie do jakości energii elektrycznej oraz ich wpływu na jakość tej energii. Poszczególne odbiorniki powinny być badane przy określonych zakłóceniach energii elektrycznej, tzn. maksymalnych odchyleniach napięcia i częstotliwości oraz zniekształceniach napięcia mogących równocześnie wystąpić w tym systemie. Należy tutaj podkreślić, że ze względu na specyfikę elektroenergetycznej sieci okrętowej zakłócenia te mogą być znacznie większe od występujących w energetyce lądowej.

Dla danego systemu elektroenergetycznego, w odniesieniu do niektórych wskaźników jakości energii elektrycznej możliwa jest sytuacja, kiedy określona wartość bezpieczna rozważanego wskaźnika będzie wyższa od odpowiedniej wartości ekonomicznej. W takim przypadku naturalne będzie dążenie armatorów do utrzymania w sy-

stemie elektroenergetycznym wartości ekonomicznej rozważanego wskaźnika, zarówno na etapie projektowania, jak i późniejszej eksploatacji. Aby temu zapobiec, konieczne będzie wprowadzenie odpowiednich aktów normatywnych, co już w pewnym stopniu jest realizowane, lub zróżnicowanie stawek ubezpieczeniowych stosowanych przez towarzystwa asekuracyjne, zależnie od przyjętych rozwiązań technicznych poprawiających bezpieczeństwo pracy elektroenergetycznego systemu okrętowego.

Celem dalszych prac powinno być zaprojektowanie i zrealizowanie mikroprocesorowego układu do pomiaru wskaźników jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznym systemie okrętowym, a następnie zebranie materiału statystycznego, umożliwiającego sformułowanie zasad określania wartości minimalnych i optymalnych wybranych wskaźników jakości, a także opracowanie stosownych aktów normatywnych, określających zasady projektowania i eksploatacji elektroenergetycznych systemów okrętowych.

LITERATURA

1. Bolikowski J., Czarnecki L., Miłek M.: *Pomiary wartości skutecznej i mocy w obwodach o przebiegach niesinusoidalnych*. Wyd. I PWN, Warszawa 1990.
2. Czarnecki L.: *Poprawa współczynnika mocy, jakości zasilania i obciążenia z perspektywy teorii mocy*. Referat wygłoszony na konferencji EPN 95 w Zielonej Górze.
3. Frąckowiak J., Rawicki S., Stein Z., Stolpe M.: *Badanie wpływu niesymetrii i niesinusoidalności napięcia zasilającego na pracę trójfazowych silników indukcyjnych*. JUEE, 1995, 1, 73–83.
4. Kowalski Z.: *Cechy i parametry jakościowe energii elektrycznej*. JUEE, 1995, 1, 1, 7–16.
5. Kowalski Z., Patkowski J., Szeleźniak J.: *Analiza pracy zautomatyzowanej elektrowni na statku Franciszek Zubrzycki*. Budownictwo Okrętowe, grudzień 1974, 498–501.
6. Kuśmierk Z.: *Zastosowanie komputerowych technik pomiarowych do badania jakości energii elektrycznej*. JUEE, 1995, 1, 1, 47–53.
7. Mindykowski J.: *Pomiary eksploatacyjne i diagnostyczne parametrów elektroenergetycznego systemu okrętowego*. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska, marzec 1994, 24–28.
8. Mindykowski J., Tarasiuk T.: *Zagadnienie jakości wytwarzania i użytkowania energii elektrycznej w okrętowym systemie elektroenergetycznym*. JUEE, 1996, 2, 2, 71–81.
9. Pałczyńska B.: *Operacje zwiększające dokładność pomiarów zakłóceń małowoltowościowymi metodami cyfrowymi w liniach zasilania niskiego napięcia*. W: *Materiały XVII Międzynarodowej Konferencji Metrologów*. Zielona Góra 1995, 312–317.
10. Pałczyńska B.: *Metody pomiaru zakłóceń przewodzonych w liniach zasilania niskiego napięcia*. Prace niepublikowane Katedry Radioelektroniki Morskiej WSM w Gdyni (1995).
11. *Poradnik Inżyniera Elektryka*. Wyd. 1 Tom 2. WNT, Warszawa 1995, 605–606.
12. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1995, 10, 275.
13. *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich*. PRS, Gdańsk 1995.
14. Reinecke H., Schild W.: *Harmonics in main electric supply systems with semiconductor rectifiers and subsequent methods of compensation*: IMECE'91 China, 1991, 1–10.
15. Sasdelli R., Menchetti A.: *Measurement of unwanted power in power quality management*: IMEKO'94. Torino 1994, 697–702.
16. Szczepaniak C.: *Analogowe operacyjne metody pomiarów wielkości elektrycznych przy odkształconych przebiegach napięcia i prądu*. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1991, 6, 131–134.
17. Wyszkowski S.: *Elektrotechnika okrętowa*. Wyd. 1, Tom 1. Wyd. Morskie. Gdańsk 1991.



Dr hab. inż. Janusz Mindykowski

Urodził się w 1950 roku w Gdańsku. Studia wyższe ukończył w 1974 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej. W latach 1974–1976 był zatrudniony w Instytucie Automatyki Systemów Energetycznych — Oddział Gdańsk, a od roku 1976 pracuje w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni. W 1981 roku doktoryzował się na Politechnice Gdańskiej w zakresie metrologii elektrycznej, a w 1993 r. na Politechnice Warszawskiej uzyskał stopień doktora habilitowanego w tej samej specjalności. Od 1993 roku jest zatrudniony na stanowisku profesora nadzwyczajnego w Wyższej Szkole Morskiej w Gdyni. W latach 1985–1990 był prodziekanem Wydziału Elektrycznego ds. dydaktycznych, od 1990 do 1993 r. dziekanem tegoż Wydziału. W latach 1993–1996 pełnił funkcję pełnomocnika rektora ds. badań naukowych. Od 01.09.1996 Prorektor ds. Nauki Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni. Jego główne zainteresowania naukowe związane są z pomiarami i diagnostyką okrętowych systemów technicznych, a zwłaszcza elektroenergetycznych sieci okrętowych. Autor licznych publikacji i wystąpień konferencyjnych, a także wielu rozwiązań chronionych patentami i wdrożonych do praktyki przemysłowej

z zakresu uprawianej specjalności. Jest członkiem „Fellow” IEE, przewodniczącym IEE Poland Gdańsk Area, członkiem rzeczywistym Stowarzyszenia Tłumaczy Polskich, a także członkiem Polskiego Stowarzyszenia Pomiarów, Automatyki i Robotyki, Polskiego Stowarzyszenia Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej oraz Polskiej Sekcji Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO).



Mgr inż. Tomasz Tarasiuk

Urodził się w roku 1964. Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni w 1989 r. Po ukończeniu studiów rozpoczął pracę w Polskiej Żegludze Morskiej, jako członek załóg pływających tego armatora, a w 1994 roku — na stanowisku asystenta w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni. Jego zainteresowania naukowe skoncentrowane są na zagadnieniach związanych z jakością energii elektrycznej wytwarzanej i użytkowanej w elektroenergetycznych sieciach okrętowych. Ma dyplom oficera elektryka okrętowego.