

ZAGADNIENIE JAKOŚCI WYTWARZANIA I UŻYTKOWANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ W OKRĘTOWYM SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

Quality of Production and Utilization of Electrical Energy in Ship Power Engineering System

Janusz MINDYKOWSKI, Tomasz TARASIUK

Wyższa Szkoła Morska w Gdyni

Streszczenie: W artykule podano podstawowe informacje dotyczące wytwarzania i użytkowania energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach okrętowych, z podkreśleniem ich specyfiki. Podjęto próbę zdefiniowania jakości energii w takich sieciach w odniesieniu do procesów jej wytwarzania i użytkowania. Przedstawiono mechanizmy i odnośne procedury rozdziału mocy czynnej i biernej między współpracujące równolegle zespoły prądotwórcze, a także omówiono przyczyny i podano przykłady typowych zakłóceń występujących w okrętowych sieciach elektroenergetycznych. Przedyskutowano również wpływ jakości energii na pracę odbiorników, z uwzględnieniem zmian napięcia i częstotliwości, zniekształceń krzywej napięcia zasilającego oraz nieprawidłowego rozplywu obciążeń między pracujące równolegle zespoły prądotwórcze. Następnie krótko scharakteryzowano pomiary eksploatacyjne i diagnostyczne aktualnie realizowane w okrętowych systemach elektroenergetycznych, zwracając uwagę na brak kontroli zniekształceń oraz chwilowych odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowych, mimo uwzględnienia tych parametrów w odnośnych przepisach towarzystw klasyfikacyjnych. Stąd też uznano za celowe i konieczne przedstawienie w dalszych pracach propozycji dotyczących metod pomiaru wybranych wskaźników jakości energii w rozważanych sieciach i wskazanie stosownego instrumentarium do ich realizacji.

Summary: The paper presents basic information concerning production and utilization of electrical energy in ship power engineering systems, taking into account their characteristics. It attempts to define electrical power quality in these systems in relation to processes of electrical power production and utilization. The mechanisms and related procedures of active and reactive power distribution between generating sets working in parallel are shown. Reasons for and examples of typical disturbances occurring in ship power engineering systems are pointed out and discussed. The influence of electrical power quality on correct operation of receivers, considering voltage and frequency changes, voltage supply distortion and incorrect load distribution between generators working in parallel is discussed. Exploitation and diagnostic measurements currently made in ship power engineering systems are briefly described, considering the lack of control of distortions and instantaneous voltage and frequency deviations from their nominal values. Therefore, it is useful and necessary to propose methods to measure selected power quality indicators in the networks considered and to indicate the equipment necessary to perform these measurements.

1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój elektrotechniki na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat, objawiający się m.in. wprowadzeniem szeregu nowych rozwiązań technicznych dotyczących procesów wytwarzania i użytkowania energii

elektrycznej, spowodował konieczność nowego spojrzenia na zagadnienie jakości energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych. Na szczególną uwagę zasługuje stale rosnąca liczba i moc odbiorników energii elektrycznej zainstalowanych w systemie, często o nieliniowych charakterystykach, co powoduje coraz większe odchylenia

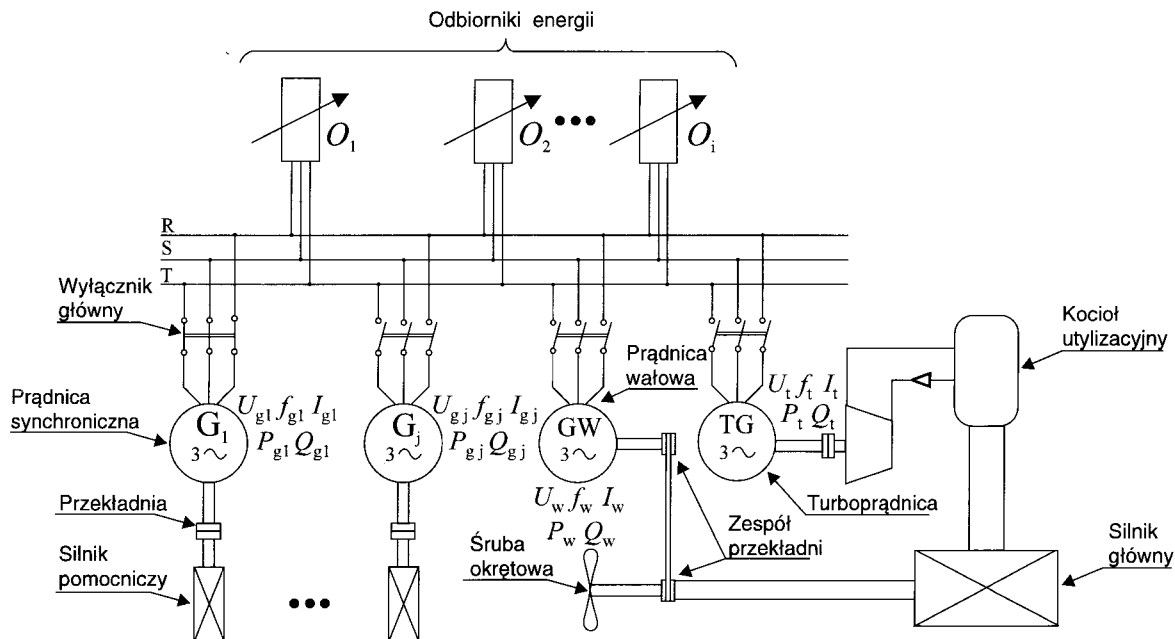
parametrów charakteryzujących energetyczne sieci zasilające od parametrów znamionowych. Zmienia się nie tylko kształt czasowych przebiegów napięcia i prądu w rozważanych systemach, ale również pojawiają się znaczące różnice między rzeczywistymi i znamionowymi wartościami napięcia i częstotliwości. Wywołuje to różnorodne negatywne skutki związane z poprawnym i efektywnym funkcjonowaniem odbiorników energii elektrycznej, powodując m.in. dodatkowe straty energii. Pojawia się potrzeba zreformowania rozliczeń za energię elektryczną, wprowadzenia nowych układów pomiarowych oraz układów kompensujących wyższe harmoniczne napięcia i prądu. Zagadnieniami tymi w odniesieniu do energetyki lądowej poświęcone są między innymi prace [8, 11, 15].

Problemy te dotyczą również, a być może nawet szczególnie, elektroenergetycznej sieci okrętowej. Statek jest miejscem o wyjątkowo dużej koncentracji obiektów technicznych, spełniających wielorakie funkcje, pracujących często w warunkach ekstremalnych narażeń klimatycznych i mechanicznych. Znaczna część tych obiektów, w tym niemal wszystkie związane ze sterowaniem i kontrolą systemów okrętowych, to urządzenia elektryczne i elektroniczne. Nieprawidłowa praca lub awaria tych urządzeń powoduje nie tylko skutki ekonomiczne, ale najczęściej wiąże się z zagrożeniem dla życia ludzkiego, a często również dla środowiska naturalnego. Wystarczy wspomnieć o znanych ze środków masowego przekazu konsekwencjach katastrof supertankowców. Wynika stąd konieczność stawiania specjalnych wymagań związanych z jakością wytwarzania i użytkowania energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej.

2. ELEKTROENERGETYCZNA SIĘĆ OKRĘTOWA

Podstawowym źródłem energii elektrycznej na statkach są trójfazowe prądnice synchroniczne napędzane pomoc-

niczymi silnikami spalinowymi, zasilanymi olejem napędowym, tzw. paliwem lekkim. Układ taki stanowi najprostsze, najkorzystniejsze pod względem wymaganych nakładów inwestycyjnych, i niezawodne rozwiązanie elektrowni okrętowej. Jednak rosnące koszty wytwarzania energii elektrycznej, wynikające ze wzrostu cen paliw, sprzyjają poszukiwaniu alternatywnych rozwiązań elektrowni okrętowych. Pojawiają się nowe konstrukcje silników pomocniczych, umożliwiające częściowe lub całkowite ich zasilanie tańszym olejem opałowym, tzw. paliwem ciężkim. Coraz częściej stosuje się prądnice wałowe, napędzane wałem śrubowym oraz prądnice napędzane turbinami zasilanymi parą wytwarzaną w kotłach ogrzewanych spalinami odlotowymi [13, 19]. Stosuje się również dodatkowe turbiny spalinowe mocy zwrotnej, mogące współpracować z prądnicą wałową, turboprądnicą lub wolno stojącym zespołem prądotwórczym [17]. Rozwiązaniem interesującym ze względów ekonomicznych może być wykorzystanie w elektrowni okrętowej prądnic asynchronicznych jako prądnic wałowych lub napędzanych silnikami pomocniczymi [10]. Niestety, prądnice wałowe i turboprądnice mogą dostarczać energię elektryczną tylko w czasie podróży statku. Inną niedogodnością w stosowaniu prądnic wałowych jest ich trudna współpraca z klasycznymi zespołami prądotwórczymi, stąd też wykorzystywane są one głównie podczas długich podróży (np. przez Atlanty), przy jednoczesnym odłączeniu od szyn głównych elektrowni okrętowej, pozostałych źródeł energii elektrycznej. Nadto, maksymalna moc turboprądnicy wykorzystującej spaliny odlotowe, która wytwarza energię elektryczną najtaniej, jest ograniczona parametrami silnika głównego i nie przekracza zwykle 500 kW [1]. Należy również podkreślić fakt, że niekonwencjonalne rozwiązania elektrowni okrętowej są z reguły bardziej skomplikowane konstrukcyjnie i prowadzą do pewnych ograniczeń i trudności eksploatacyjnych, nie pozostających bez wpływu na podstawowe parametry energii elektrycznej wytwarzanej w elektroenergetycznej sieci okrę-



Rys. 1. Przykładowy schemat elektroenergetycznej trójfazowej sieci okrętowej

towej. Przykładowy schemat trójfazowej sieci okrętowej z prądnicą wałową, prądnicą napędzaną turbiną zasilaną parą wytwarzaną w kotle ogrzewanym spalinami odlotowymi i prądnicami napędzanymi pomocniczymi silnikami spalinowymi przedstawiono na rysunku 1.

Dobór liczby, mocy i rodzaju prądnic okrętowych jest uzależniony od wielu czynników [19], którymi są m.in.: minimalne koszty inwestycji, remontów i wytwarzania energii, prostota obsługi i bezpieczeństwo statku. Właśnie ze względu na bezpieczeństwo statku instytucje klasyfikacyjne stawiają wymagania odnośnie minimalnej liczby i mocy prądnic zainstalowanych na statku. Przykładowo, Polski Rejestr Statków wymaga, aby na każdym statku o pojemności brutto większej od 300 RT jako podstawowe źródło energii elektrycznej, były zainstalowane co najmniej dwie prądnice z niezależnym napędem [22]. Prądnica wałowa może być jednym z tych zespołów prądowców jedynie po spełnieniu dodatkowych warunków określonych odnośnymi przepisami.

Elektroenergetyczna sieć okrętowa jest siecią elastyczną. Charakteryzuje się dużymi zmianami napięcia i częstotliwości, wynikającymi z porównywalnych mocy elektrowni okrętowej i załączanych odbiorników energii, np. sterów strumieniowych. Przeciętne moce elektrowni okrętowych nie przekraczają z reguły pojedynczych MVA, natomiast moce elektrycznych silników napędowych sterów strumieniowych często przekraczają 750 kW [3]. Ważnym wyróżnikiem elektroenergetycznych sieci okrętowych na współczesnych statkach jest występowanie odkształconych przebiegów napięcia i prądu, powodowanych powszechnym stosowaniem przekształtników półprzewodnikowych, m.in. w układach napędowych urządzeń pokładowych oraz w układach umożliwiających współpracę prądnic wałowych z siecią okrętową [19]. Innym elementem, charakterystycznym dla okrętowej sieci elektroenergetycznej, jest konieczność równoległej pracy co najmniej dwóch zespołów prądowców w okresach przewidywanego zwiększonego zapotrzebowania na energię, takich jak manewry statku i prace wyładunkowe. Powoduje to konieczność regulacji rozptywu mocy czynnej i biernej pomiędzy współpracującymi prądnice. Nieproporcjonalny rozptyw mocy może spowodować pozorne przeciążenie elektrowni okrętowej, a w konsekwencji odłączenie odbiorów mniej ważnych lub nawet zanik zasilania w elektroenergetycznej sieci okrętowej tzw. „blackout” [6], o skutkach trudnych do przewidzenia, szczególnie w złych warunkach pogodowych.

3. JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W ELEKTROENERGETYCZNEJ SIECI OKRĘTOWEJ

3.1. Czym jest jakość energii w elektroenergetycznej sieci okrętowej?

Sieć elektroenergetyczna powinna być tak zaprojektowana, aby zapewnić odpowiednią jakość dostarczanej energii przy minimum poniesionych kosztów. O jakości energii decydują: odpowiedni poziom napięcia, odpowied-

nia częstotliwość, nieodkształcona krzywa napięcia zasilającego i symetria napięć zasilających [21]. W odniesieniu do elektroenergetycznych sieci okrętowych można jeszcze dodać wystarczającą dokładność stabilizacji napięcia i częstotliwości w stanach dynamicznych oraz ograniczenie poziomu zakłóceń radioelektrycznych [19]. Wymagania dotyczące ograniczenia poziomu zakłóceń radioelektrycznych są spowodowane koniecznością zapewnienia poprawnej pracy urządzeń radiokomunikacyjnych i radionawigacyjnych. Zakłócenia radioelektryczne generowane głównie przez urządzenia energoelektroniczne, przenoszą się dwiema drogami: przez przewody zasilające sieci elektrycznej i przez bezpośrednie promieniowanie. Ponieważ same urządzenia mają szczelne metalowe obudowy oraz są ekranowane, przenoszenie zakłóceń przez promieniowanie nie odgrywa praktycznie większej roli i decydujące znaczenie ma przenoszenie zakłóceń drogą przewodową [19]. Pewnym wyjątkiem od tej reguły mogą być zakłócenia wielkich częstotliwości. Dopuszczalne poziomy zakłóceń radioelektrycznych są określone przepisami instytucji klasyfikacyjnych.

Jakość energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej jest uwarunkowana zarówno jakością wytwarzania energii przez zespoły prądowców, jak i jakością jej użytkowania przez odbiorniki energii elektrycznej. Obydwa te zagadnienia łączą się ze sobą i jedynie przy przyjęciu określonych założeń mogą być rozpatrywane niezależnie. Niedostateczna jakość użytkowania energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej powoduje pogorszenie jakości wytwarzania tej energii i odwrotnie, tzn. przy niewłaściwej jakości wytwarzania energii elektrycznej następuje pogorszenie jakości jej użytkowania.

3.2. Jakość wytwarzania energii w elektroenergetycznej sieci okrętowej

Jakość wytwarzania energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej zależy głównie od rodzaju jednostek napędowych prądnic oraz właściwości urządzeń do regulacji napięcia prądnic okrętowych i regulacji prędkości obrotowej urządzeń napędowych. Najczęściej spotykanym na statkach rozwiązaniem elektrowni okrętowej jest układ, złożony z co najmniej trzech prądnic synchronicznych napędzanych pomocniczymi silnikami spalinowymi. Każdy z zespołów prądowców wyposażony jest w niezależne układy do regulacji napięcia i prędkości obrotowej oraz niezależny od regulatora prędkości obrotowej regulator bezpieczeństwa, zabezpieczający przed przekroczeniem maksymalnej dopuszczalnej prędkości obrotowej (według PRS konieczny dla silników spalinowych o mocy powyżej 220 kW). Dokładność dynamicznej i statycznej regulacji napięcia i częstotliwości jest określona w wymaganiach właściwych instytucji klasyfikacyjnych.

Zgodnie z Przepisami Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich Polskiego Rejestru Statków (PRS) [22], zespół prądowców, wraz ze współpracującymi z nim układami regulacji prędkości obrotowej (częstotliwości) i napięcia, powinien zapewniać:

- a) Utrzymywanie ustalonej prędkości obrotowej z dokładnością $\pm 5\%$ prędkości znamionowej, przy zmia-

nach obciążenia od 0 do 100% obciążenia znamionowego.

- b) Przy nagłym zdjęciu obciążenia znamionowego lub nagłym obciążeniu zespołu połową obciążenia znamionowego zmiana prędkości obrotowej nie powinna przekraczać $\pm 10\%$, a ustalona prędkość obrotowa powinna zostać osiągnięta w czasie nie dłuższym niż 5 sekund.
- c) Utrzymywanie napięcia z dokładnością $\pm 2,5\%$ napięcia znamionowego, przy zmianach obciążenia od 0 do 100% obciążenia znamionowego i znamionowym współczynniku mocy. Przy zmianach współczynnika mocy w zakresie od 0,6 do 0,9 (z wyjątkiem znamionowego) dopuszczalne są odchylenia napięcia od wartości znamionowej o $\pm 3,5\%$ tej wartości, przy znamionowej prędkości obrotowej i znamionowym obciążeniu.
- d) Przy nagłej zmianie obciążenia prądnicy, pracującej ze znamionową prędkością obrotową i przy znamionowym napięciu, zmiana napięcia powinna być nie większa niż -15 i $+20\%$ wartości znamionowej, a czas powrotu do napięcia ustalonego powinien być nie dłuższy niż 1,5 sekundy.

Powyższe wymagania nie dotyczą regulatorów napięcia prądnic awaryjnych. W tym przypadku dopuszczalne zmiany napięcia są nieco większe niż w przypadku podstawowych prądnic. Zgodnie z odnośnymi przepisami Polskiego Rejestru Statków, aby zapewnić poprawną pracę okrętowych urządzeń elektrycznych, odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowych nie powinny przekraczać wartości podanych w tabeli 1 [22].

Tabela 1. Graniczne wartości odchyleń napięcia i częstotliwości od wartości znamionowych w elektroenergetycznej sieci okrętowej — ze względu na poprawną pracę odbiorników

Parametr	Odchylenie od wartości znamionowej		
	długotrwałe		krótkotrwałe
	wartość [%]	wartość [%]	czas [s]
Napięcie	+6,0	± 20	1,5
	-10,0		
Częstotliwość	$\pm 5,0$	± 10	5,0

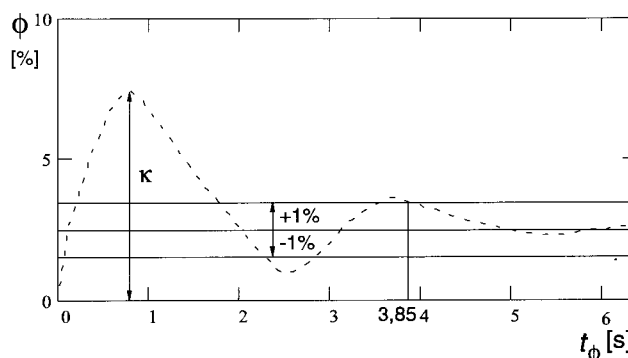
Przykładowe badania przeprowadzono na statku o zautomatyzowanej elektrowni [9], składającej się z trzech zespołów prądotwórczych określonych parametrami:

- moc prądnicy 650 kVA
- napięcie znamionowe 450 V
- prędkość obrotowa 720 obr./min

i wyposażonych w regulatory prędkości obrotowej typu Woodward UG8 oraz regulatory napięcia typu TUR. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że przy nagłych zmianach obciążenia czynnego w granicach od 60 do 100% obciążenia znamionowego stosowane układy regulacji prędkości obrotowej i napięcia zapewniają przebieg procesów przejściowych opisanych następującymi wskaźnikami:

- uchyb dynamiczny regulacji prędkości obrotowej nie większy niż 10%;
- czas procesu przejściowego regulacji prędkości obrotowej nie większy niż 4,45 s;
- uchyb dynamiczny regulacji napięcia nie większy niż 14 V;
- czas procesu przejściowego regulacji napięcia nie większy niż 1,5 s.

Znaczny i długotrwały uchyb dynamiczny w regulacji prędkości obrotowej jest spowodowany stosunkowo dużym opóźnieniem uruchomienia regulatora i powolnym jego działaniem. Należy tutaj zaznaczyć, że hydrauliczno-mechaniczne regulatory prędkości obrotowej firmy Woodward typu UG są nadal instalowane na statkach morskich, stąd też przytoczone wyniki w sensie jakościowym są nadal aktualne. Przykładową charakterystykę procesów przejściowych przy regulacji prędkości obrotowej przedstawiono na rysunku 2 [2].



Rys. 2. Przebieg procesu przejściowego regulacji prędkości obrotowej zespołu prądotwórczego z regulatorem mechaniczno-hydraulicznym po wyłączeniu obciążenia ($85\% P_n$) ; ϕ — względna zmiana prędkości obrotowej, t_{ϕ} — czas regulacji

Ustalona prędkość obrotowa, z dokładnością $\pm 1\%$ prędkości zadeklarowanej [22], zostaje osiągnięta po czasie około 3,85 sekundy, a maksymalne przeregulowanie κ przyjmuje wartość 7,41% początkowej prędkości obrotowej.

Biorąc pod uwagę właściwości i parametry aktualnie stosowanych rozwiązań układów regulacji prędkości obrotowej i napięcia [19], za w pełni uprawnioną można uznać tezę o ich dużym wpływie na jakość wytwarzania energii w elektroenergetycznym systemie okrętowym.

Dodatkowe odchylenia napięcia w okrętowej sieci elektroenergetycznej są spowodowane spadkami napięcia na kablach zasilających, które według wymagań PRS [22] nie powinny przekraczać (w procentach napięcia znamionowego):

- dla kabli łączących prądnice z rozdzielnicą główną lub awaryjną do 1%.
- dla kabli łączących rozdzielnicę główną lub awaryjną z dowolnymi odbiornikami do 6%, w normalnych warunkach pracy. Dla latarni sygnałowo-pozycyjnych dopuszczalne spadki napięcia mogą być ograniczone do mniejszych wartości w celu zapewnienia wymaganych charakterystyk świetlnych. Przy krótkotrwałych obciążeniach, np. przy rozruchu silników

elektrycznych, dopuszczalne są wyższe spadki napięcia, jeżeli nie będzie to miało ujemnego wpływu na pracę pozostałych odbiorników w instalacji.

- c) dla kabli zasilających silniki prądu przemiennego z bezpośrednim rozruchem do 25% w chwili rozruchu.

W zawodowej energetyce lądowej dopuszczalne odchylenia napięcia nie są znormalizowane i są jedynie przedmiotem zaleceń i wskazówek. W zależności od rodzaju odbiornika i zasilania w instalacjach elektroenergetycznych wewnętrznych o napięciu wyższym niż 42 V dopuszczalne spadki napięcia wynoszą 2...9% [12], a dopuszczalne odchylenia częstotliwości w energetyce lądowej określa się jako +0,2 Hz i -0,5 Hz w czasie ponad 15 minut [21].

Zgodnie z wymaganiami PRS [22] i PN-72/E-06000 [20] prądnice okrętowe prądu przemiennego powinny wytwarzać praktycznie sinusoidalne napięcie trójfazowe symetryczne, tzn. dla takich prądnic różnica między wartością chwilową krzywej generowanego napięcia a odpowiednią wartością pierwszej harmonicznej nie powinna przekraczać 5% wartości szczytowej pierwszej harmonicznej [22], a wartości składowej symetrycznej przeciwnej i wartości składowej symetrycznej zerowej nie przekraczają 2% wartości składowej symetrycznej zgodnej [20]. Jednak w czasie eksploatacji mogą pojawić się niesymetrie napięć fazowych prądnic okrętowych związane z niesymetrycznym obciążeniem lub natury konstrukcyjnej. Zjawisko takie zostało zaobserwowane w czasie eksploatacji wielu statków. Przykładowo, na statku m/s „Zagłębie Siarkowe” spowodowane ono było przesunięciem osi symetrii wirnika względem osi symetrii stojana na skutek wyżłobienia wału wirnika w miejscu jego ułożyskowania [18]. Stwierdzono również, że podobny skutek mogą wywołać zwarcia międzyzwojowe.

Wcześniej wspomniana konieczność regulacji rozplywu mocy czynnej i biernej między współpracujące równolegle zespoły prądotwórcze jest określona odpowiednimi Przepisami Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich PRS [22]. Według tych przepisów obciążenie czynne każdego z zespołów prądotwórczych, w zakresie od 20 do 100% obciążenia znamionowego, nie powinno różnić się od wartości proporcjonalnej do mocy poszczególnych prądnic więcej niż o 15% znamionowej mocy czynnej największej prądnicy pracującej równolegle lub o 25% znamionowej mocy czynnej rozpatrywanej prądnicy — w zależności od tego, która z tych wartości jest mniejsza. Odpowiednio, obciążenie mocą bierną każdej prądnicy nie powinno przekraczać wartości proporcjonalnej do ich mocy więcej niż o 10% znamionowego obciążenia biernego największej prądnicy lub o 25% mocy znamionowej najmniejszej prądnicy. Ponadto w zakresie obciążeń od 20 do 100% obciążenia znamionowego dopuszcza się wahania prądu w granicach $\pm 15\%$ wartości prądu znamionowego największej prądnicy.

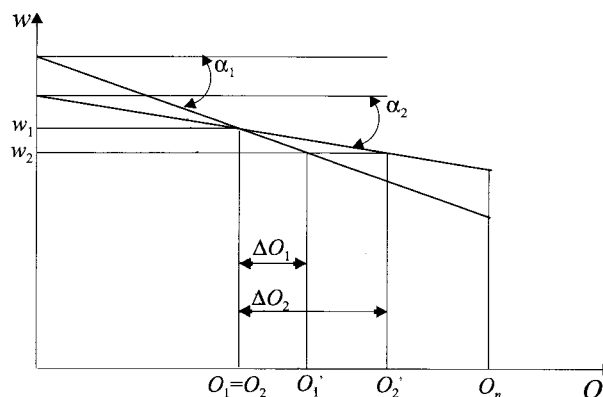
Obecnie najczęściej spotykaną metodą regulacji rozplywu obciążeń czynnych i biernych między równolegle pracujące prądnice jest metoda tzw. charakterystyk statycznych [19]. Jest to metoda najmniej dokładna, ale stosunkowo prosta i dzięki temu wciąż stosowana. Z uwagi na fakt, iż przewidywany okres eksploatacji obe-

nie budowanych statków wynosi z reguły ponad 20 lat, metoda ta będzie miała w najbliższym czasie istotny wpływ na jakość energii wytwarzanej w elektroenergetycznych sieciach okrętowych. Regulatory, zarówno napięcia, jak i prędkości obrotowej zespołów prądotwórczych, mają charakterystyki zapewniające zmianę prędkości obrotowej i napięcia wraz ze zmianą, odpowiednio, obciążenia czynnego i biernego zespołu, co ilustruje rysunek 3. Nachylenie charakterystyk statycznych tych regulatorów można określić za pomocą współczynnika statyzmu [16]:

$$k_S = \frac{w_n - w_0}{O_n} \quad (1)$$

gdzie:

- w_n — wielkość regulowana przy obciążeniu znamionowym, tj. napięcie lub prędkość obrotowa;
- w_0 — wielkość regulowana przy biegu jałowym;
- O_n — obciążenie znamionowe, moc czynna przy regulacji prędkości obrotowej lub moc bierna przy regulacji napięcia.



Rys. 3. Rozkład obciążenia między równolegle pracujące zespoły prądotwórcze o różnych współczynnikach statyzmu k_{s1} i k_{s2} oraz różnych nastawach wielkości regulowanej

Na powyższym rysunku przedstawiono najczęściej występujący przypadek pracy równoległej identycznych zespołów prądotwórczych o różnych współczynnikach statyzmu i różnych wartościach wielkości regulowanych, tj. prędkości obrotowej i napięcia. Przed zmianą obciążenia rozkład obciążeń czynnych i biernych jest symetryczny, najczęściej dzięki takiemu przesunięciu charakterystyk statycznych układów regulacji przez obsługę, aby uzyskać wyrównanie obciążeń. Wzrost obciążenia elektrowni okrętowej o ΔO powoduje zmianę wielkości regulowanych o $\Delta w = w_1 - w_2$ oraz pojawienie się nierównomiernego rozplywu obciążeń czynnych i biernych. Można zapisać:

$$\Delta O = \Delta O_1 + \Delta O_2 \quad (2)$$

gdzie:

- ΔO — wzrost obciążenia elektrowni okrętowej;
- $\Delta O_1, \Delta O_2$ — wzrost obciążenia zespołu

prądowórczego, odpowiednio nr 1 i nr 2; oraz korzystając z zależności (1):

$$\Delta O_1 = \frac{\Delta w}{\tan(\alpha_1)} = \frac{\Delta w}{k_{s1}} \quad (3)$$

$$\Delta O_2 = \frac{\Delta w}{\tan(\alpha_2)} = \frac{\Delta w}{k_{s2}} \quad (4)$$

gdzie:

Δw — zmiana wielkości regulowanej;

k_{s1}, k_{s2} — współczynnik statyzmu układu regulacji wielkości regulowanej w zespole prądowórczego, odpowiednio nr 1 i nr 2.

Przekształcając zależności (2), (3), (4) otrzymuje się:

$$\Delta w = \frac{\Delta O}{\frac{1}{k_{s1}} + \frac{1}{k_{s2}}} \quad (5)$$

Nierównomierność rozplywu obciążeń można opisać zależnością:

$$\delta = \frac{\Delta O_2 - \Delta O_1}{O_n} \quad (6)$$

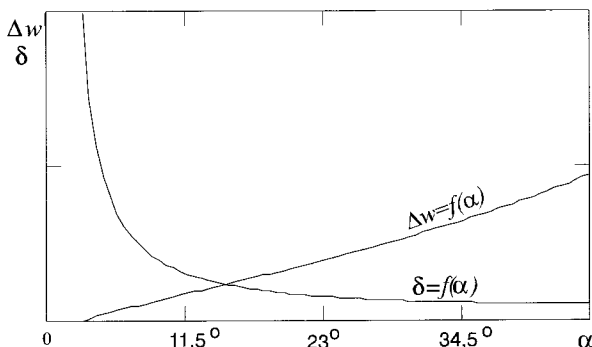
Po uwzględnieniu zależności (3), (4), (5) wyrażenie (6) przyjmuje postać:

$$\delta = \frac{\Delta O}{O_n} \cdot \frac{\frac{1}{k_{s2}} - \frac{1}{k_{s1}}}{\frac{1}{k_{s1}} + \frac{1}{k_{s2}}} \quad (7)$$

gdzie:

O_n — obciążenie znamionowe zespołu.

Przykładowe charakterystyki opisujące zmiany Δw i δ przy wzroście obciążenia o ΔO dla różnych kątów nachylenia α charakterystyk statycznych układów regulacji przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowy przebieg zmian Δw i δ w funkcji współczynników statyzmu układów regulacji zespołów prądowórczych, określonych wartościami kątów α_1 i α_2 wg. rysunku 4, gdzie $\alpha_1 = 3...45^\circ$, zaś α_2 przyjmuje wartości odpowiednio o 3° mniejsze.

Jak wynika z rysunku 4, postulat zapewnienia dokładnej regulacji rozplywu obciążeń metodą charakterystyk statycznych wiąże się z zapewnieniem dużych współczynników statyzmu poszczególnych zespołów prądowórczych. Jednakże duży współczynnik statyzmu, korzystny z powyższego punktu widzenia, jest w sprzeczności z wymaganiami dotyczącymi utrzymywania stałych wartości napięcia i częstotliwości w elektroenergetycznej sieci okrętowej, co zmusza do poszukiwania kompromisu w tym zakresie. Na podstawie wyników doświadczeń eksploatacyjnych regulatorów prędkości obrotowej jako najkorzystniejszy współczynnik statyzmu określa się ten, przy którym względna zmiana prędkości obrotowej w zakresie od biegu jałowego do obciążenia znamionowego wynosi od 3 do 5% znamionowej prędkości obrotowej, co pozwala na osiągnięcie dokładności rozdziału mocy czynnej rzędu 6...7% [16]. Ponadto należy stwierdzić, że zbyt mała nastawa współczynników statyzmu hydrauliczno-mechanicznych regulatorów prędkości obrotowej może doprowadzić do tzw. „kołysania”, czyli wielokrotnego wzajemnego przekazywania obciążeń między współpracującymi zespołami, które może mieć charakter ciągły lub gasnący.

Innym zagadnieniem, związanym z koniecznością zapewnienia proporcjonalnego rozdziału obciążeń między współpracujące równoległe zespoły prądowórcze, jest możliwa odmienność właściwości dynamicznych ich układów regulacji. Istotnie różniące się charakterystyki dynamiczne powodują niejednakowe przejmowanie obciążenia przez poszczególne zespoły w stanach przejściowych. Ze względu na znaczny czas regulacji, zwłaszcza prędkości obrotowej, może to być przyczyną zadziałania zabezpieczeń, a w konsekwencji zaniku zasilania w elektroenergetycznej sieci okrętowej.

Oprócz przedstawionej metody charakterystyk statycznych stosuje się również inne metody regulacji rozplywu obciążeń czynnych i biernych między pracujące równoległe prądnice, których opisy można znaleźć m.in. w pracach [16] i [19].

Zastosowanie prądnicy wałowej stwarza dodatkowe problemy związane z koniecznością utrzymywania stałej częstotliwości w elektroenergetycznej sieci okrętowej. PRS wymaga, aby prądnica wałowa stosowana jako podstawowe źródło energii elektrycznej miała praktycznie stałą prędkość obrotową przy różnych prędkościach statku. Spełnienie tego postulatu nie jest łatwe nawet na statkach wyposażonych w śrubę nastawną. Jakość energii wytwarzanej w takich sieciach okrętowych zależała będzie m.in. od tak nieprzewidywalnego czynnika, jakim jest stan morza. Warto dodać, iż oprócz dotychczas rozważanego (rys. 1) istnieją również inne rozwiązania elektrowni okrętowych wyposażonych w prądnice wałowe, jednak ich szersze omówienie przekracza przyjęty przez autorów zakres niniejszej pracy.

3.3. Jakość użytkowania energii w elektroenergetycznej sieci okrętowej

Pod pojęciem jakości użytkowania energii elektrycznej należy rozumieć właściwość odbiorników energii elektrycznej, polegającą na niezakłócaniu pracy innych odbiorników, zasilanych z tej samej sieci elektroenergetycznej,

zarówno w stanach ustalonych, jak i przejściowych. Można stwierdzić, że każdy odbiornik energii elektrycznej o odpowiednio dużej mocy wpływa negatywnie na podstawowe parametry sieci zasilającej. Dotyczy to zwłaszcza elektroenergetycznej sieci okrętowej, która, jak to wcześniej wskazano, charakteryzuje się małą odpornością na zakłócający wpływ pojedynczych odbiorników o odpowiednio dużych mocach. Zakłócające działanie odbiorników energii elektrycznej na jej jakość w sieci okrętowej objawia się przede wszystkim jako:

- stany przejściowe wynikające z załączania i wyłączania dużych odbiorników energii elektrycznej;
- stany przejściowe wynikające z nieprawidłowej pracy odbiorników energii elektrycznej;
- wprowadzanie wyższych harmonicznych prądu do sieci przez obciążenia o charakterze nieliniowym;
- asymetria obciążenia.

Podstawowym źródłem wahań napięcia i częstotliwości w elektroenergetycznej sieci okrętowej są duże odbiorniki energii elektrycznej. Są to najczęściej silniki elektryczne, z których znaczna część jest przewidziana do rozruchu bezpośredniego. Moce znamionowe np. silników napędowych sprężarek powietrza rozruchowego lub wind kotwicznych mogą stanowić od kilku do kilkunastu procent mocy znamionowej pojedynczych zespołów prądotwórczych, a nawet, jak w przypadku silników napędowych sterów strumieniowych, mogą być z nimi porównywalne. Znaczne prądy pobierane w czasie rozruchu tych silników powodują, oprócz spadku napięcia na zaciskach prądnic, spadki napięcia na rezystancjach kabli łączeniowych. Reaktancje kabli ze względu na ich niewielką długość i z reguły niskie napięcia w elektroenergetycznej sieci okrętowej są pomijalnie małe [19].

Zniekształcenia napięcia w sieciach okrętowych w przeszłości powodowane głównie procesami łączeniowymi w aparaturze rozdzielczej i w odbiornikach oraz przepięciami przy przepalaniu się bezpieczników, dzisiaj często wywoływane są przez powszechnie stosowane przekształtniki półprzewodnikowe. Zniekształcenia te, towarzyszące pracy urządzeń energoelektronicznych, wynikają ze spadków napięć na rezystancjach kabli i impedancjach prądnic, wywołanych przez pierwotnie zniekształcone prądy pobierane przez przekształtniki półprzewodnikowe. Zniekształcenia napięcia można określić za pomocą wskaźnika zniekształceń napięcia K_u [22] oraz wskaźnika maksymalnego odchylenia chwilowej wartości napięcia od pierwszej harmonicznej u_w [22].

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_c} \cdot 100\% \quad (8)$$

gdzie:

U_n — wartość skuteczna n-tej harmonicznej napięcia;

U_c — wartość skuteczna całego przebiegu napięcia.

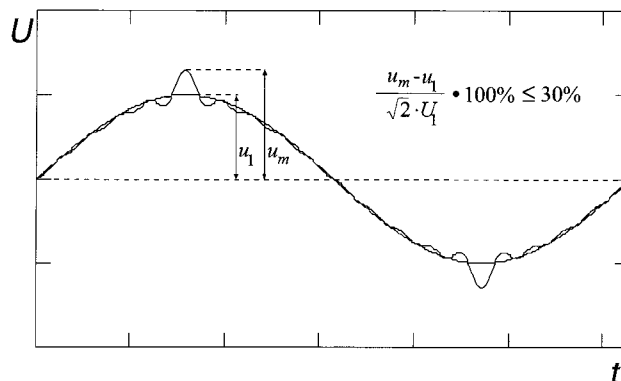
$$u_w = \frac{\Delta U_m}{\sqrt{2} U_1} \cdot 100\% \quad (9)$$

gdzie:

ΔU_m — wartość maksymalna odchylenia;

U_1 — wartość skuteczna pierwszej harmonicznej napięcia.

Zgodnie z przepisami PRS wskaźnik zniekształceń napięcia K_u nie powinien być większy od 10%, natomiast wskaźnik maksymalnego odchylenia u_w chwilowej wartości napięcia od pierwszej harmonicznej nie powinien przekraczać 30%, tak jak przedstawiono to na rysunku 5.



Rys. 5. Przykładowy przebieg sygnału, przy którym u_w jest równy 30%, a $K_u = 9,95\%$

W przypadku energetyki lądowej wskaźnik zniekształceń napięcia zdefiniowany za pomocą zależności (2) może przyjmować wartości podane w tabeli 2 [21].

Tabela 2. Zestawienie wartości wskaźnika zniekształceń napięcia wg. zależności (2) dla potrzeb energetyki lądowej.

Sieci	Zalecane wartości dopuszczalne		Graniczne wartości dopuszczalne	
	poziom [%]	wartość chwilowa [%]	poziom [%]	wartość chwilowa [%]
110 kV	1,5	3,0	3,0	4,5
SN	5,0	10,0	10,0	15,0
nn	7,0	14,0	10,0	15,0

Poziom zniekształceń napięcia w danym punkcie sieci jest określony wartością wskaźnika zniekształceń napięcia, która nie jest przekraczana w ciągu 90% doby. Wskaźnik zniekształceń napięcia w energetyce lądowej oblicza się dla 25 harmonicznych [21].

Zakłócenia radioelektryczne w elektroenergetycznej sieci okrętowej powodowane są zarówno normalną pracą zainstalowanych w systemie odbiorników energii elektrycznej, jak i uszkodzeniami elementów systemu, a także wyładowaniami elektrostatycznymi oraz naturalnym środowiskiem elektromagnetycznym, kształtowanym np. przez wyładowania atmosferyczne [5]. Istotne dla oceny jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej są zakłócenia radioelektryczne występujące

w sieci zasilającej, szczególnie w odniesieniu do urządzeń o małej odporności na tego rodzaju czynniki. Zgodnie z wymaganiami PRS [22] należy zapewnić odporność urządzeń elektrycznych i elektronicznych na niżej wymienione umowne zakłócenia, występujące w systemie elektroenergetycznym:

- a) Zakłócenia impulsowe nanosekundowe o amplitudzie impulsu 2 kV i czasie trwania po 3 minuty dla każdego rodzaju impulsów w obwodach zasilania i uziemienia oraz 1 kV i czasie trwania po 1 minucie dla każdego rodzaju impulsów w obwodach sterowania i sygnalizacji i stosunku czasu narastania do czasu trwania 5/50 [ns/ns].
- b) Zakłócenia impulsowe dużej energii o amplitudach i czasach trwania podobnie jak w punkcie *a*, ale o stosunku czasu narastania do czasu trwania impulsu 1,2/50 [μ s/ μ s].
- c) Zakłócenia wysokiej częstotliwości o paśmie częstotliwości od 10 kHz do 50 MHz i poziomie wartości skutecznej sygnału 1,5 V z modulacją amplitudy 30 % z częstotliwością 1 kHz.
- d) Zakłócenia niskiej częstotliwości w zakresie od 0,05 do 10 kHz i poziomie sygnału 10% wartości skutecznej napięcia zasilającego do 15 harmonicznej, a następnie opadającego do poziomu 1% wartości skutecznej napięcia zasilającego dla zakresu od 100 harmonicznej do 200 harmonicznej.

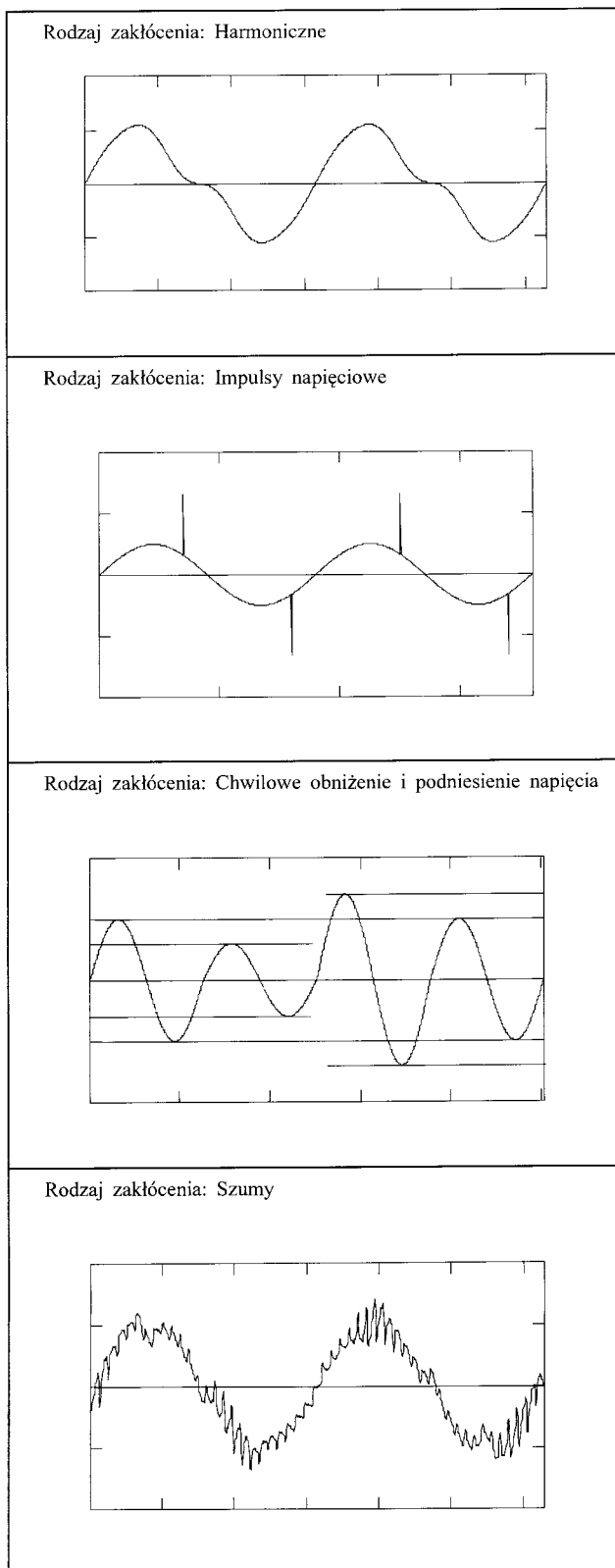
Przykłady zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych przedstawiono na rysunku 6 [4].

4. WPŁYW JAKOŚCI ENERGII NA PRACĘ ODBIORNIKÓW

4.1. Zmiany napięcia i częstotliwości

Znaczne zmiany napięcia i częstotliwości, mające charakter przejściowy oraz ustalony, są nierozłącznie związane z elektroenergetyczną siecią okrętową. Występują we wszystkich elektroenergetycznych sieciach okrętowych, niezależnie od stopnia nowoczesności statku, i negatywnie wpływają na pracę odbiorników elektrycznych, m.in. silników elektrycznych, aparatury łączeniowej, czy też źródeł światła.

Istotnym zagadnieniem jest wpływ wahań napięcia i częstotliwości na pracę silników elektrycznych. Odchylenia napięcia od wartości znamionowej powodują wzrost strat całkowitych w silniku indukcyjnym [21], zmienia się również jego prędkość obrotowa. Zmiany częstotliwości, oprócz wpływu na straty całkowite, mają istotny wpływ na prędkość obrotową silnika. Warto dodać, że wpływ odchylenia napięcia i częstotliwości na pracę silników elektrycznych uwidacznia się dopiero w dłuższym okresie ich użytkowania. Wzrost strat całkowitych powoduje wzrost temperatury uzwojeń silnika, a tym samym przyspieszone starzenie się izolacji i zwiększenie prawdopodobieństwa awarii silnika w czasie jego eksploatacji. Należy tutaj zaznaczyć, że trwałość materiałów elektroizolacyjnych stosowanych w silnikach elektrycznych maleje wykładniczo wraz ze wzrostem temperatury i nawet niewielki, kilkustopniowy wzrost temperatury izolacji może spowodować skrócenie czasu jej życia nawet o kilka-



Rys. 6. Wybrane przykłady typowych zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych

dziesiąt procent. Dla silników elektrycznych odchylenia napięcia o $\pm 5\%$ napięcia znamionowego nie powinny powodować dodatkowych przyrostów większych niż 10°C [20]. Wzrost prędkości obrotowej silnika napędowego w stosunkowo długim okresie powoduje przyspieszone zużycie elementów mechanicznych (łożyska, tłoki sprężarek itp.), natomiast spadek prędkości obrotowej oznacza

spadek przepływu mediów w okrętowych systemach chłodzenia i smarowania, mający wpływ na trwałość mechanizmów okrętowych. Nadto, przy obniżeniu prędkości obrotowej, pogarsza się chłodzenie silników elektrycznych, powodujące dodatkowy przyrost temperatury izolacji. Jeżeli zmiany napięcia i częstotliwości występują jednocześnie, przy zachowaniu stałego stosunku U/f , maksymalny elektromagnetyczny moment obrotowy nie ulega zmianie; w przybliżeniu nie zmienia się również jego moc [21]. Z tego względu wskazane jest utrzymywanie stałego stosunku U/f w elektroenergetycznej sieci okrętowej. Wymaga to ustawienia takich samych współczynników stażysty regulatorów napięcia i prędkości obrotowej.

Na pracę łączników z napędem elektrycznym decydujący wpływ mają głębokie przysiady napięcia. Obniżenie wartości napięcia powoduje w konsekwencji obniżenie siły docisku i możliwość iskrzenia styków, aż do odpadnięcia zwory w przypadku znacznych przysiadów napięcia. Ma więc ono istotny wpływ na pracę okrętowych układów sterowania. Wzrost wartości napięcia może spowodować mechaniczne uszkodzenie łącznika lub nadmierne odskoki styków zmniejszające zdolność łączeniową aparatu. Przysiady napięcia mają również istotny wpływ na pracę systemów automatyki cyfrowej, powodując przekłamania, utratę danych, fałszywe alarmy itp. Polski Rejestr Statków wymaga [22], aby zanik zasilania w układach sterowania automatycznego lub zdalnego nie powodował stanów niebezpiecznych.

W przypadku źródeł światła najczęściej spotykanych na statkach, a więc żarówek i świetlówek, zmiana napięcia zasilającego ma różny wpływ na ich funkcjonowanie. Wzrost napięcia zasilającego powoduje wzrost sprawności świetlnej żarówek, przy gwałtownym obniżeniu ich trwałości. Natomiast w przypadku świetlówek następuje obniżenie sprawności świetlnej [21]. W obu przypadkach obniżenie wartości napięcia powoduje zmniejszenie strumienia świetlnego, co pogarsza bezpieczeństwo pracy w pomieszczeniach oświetlonych sztucznym światłem (silownie okrętowe i warsztaty) oraz zmniejszenie strumienia świetlnego światła pozycyjnych, mających wpływ na bezpieczeństwo statku, zwłaszcza w warunkach ograniczonej widoczności. Przyjmuje się, że dla żarówek dopuszczalne zmiany napięcia nie powinny przekraczać -8% i $+6\%$ napięcia znamionowego [21].

4.2. Zniekształcenia krzywej napięcia zasilającego

Zniekształcenia krzywej napięcia zasilającego mają negatywny wpływ na pracę niemal wszystkich odbiorników energii elektrycznej. Powodują one nie tylko ograniczenie obciążalności prądnic wskutek efektów cieplnych wywołanych wyższymi harmonicznymi oraz większe narażenia cieplne kabli i maszyn elektrycznych [19], ale mają również istotne znaczenie dla pracy samych przekształtników półprzewodnikowych. Działanie układów energoelektronicznych w warunkach odchyłek i zniekształceń napięcia w sieci zasilającej zostało bliżej omówione w pracy [14]. Zniekształcenia krzywej napięcia mają również istotny wpływ na pracę urządzeń radiowych i radio- oraz elektronawigacyjnych. Zakłócenia tego typu łatwo przenoszą się przez sieć kablową, co powoduje konieczność ochrony tych urządzeń przez stosowanie filtrów oraz ekranowanie

zarówno kabli, jak i samych urządzeń.

Należy również wspomnieć o wpływie zniekształceń przebiegu prądu na pracę układów pomiarowych ze względu na powszechne wykorzystanie do tych celów przekładników prądowych. Przykładowo, dla przekładnika prądowego klasy 0,5 błąd szczytowy przy prądzie znamionowym o kształcie trapezowym wzrośnie do ok. 1% [7]. Wpływ kształtu prądu pierwotnego przekładnika jest także zależny od charakteru obwodu wtórnego i przyjmuje wartości maksymalne przy $\cos \varphi = 0,6 \dots 0,8$ [7]. Nadto, zniekształcenia krzywych napięcia i prądu będą negatywny wpływ na pracę regulatorów napięcia prądnic okrętowych, zwiększając odchyłki napięcia.

4.3. Nieprawidłowy rozptył obciążenia między pracujące równolegle zespoły prądotwórcze

W elektrowniach okrętowych często występuje konieczność równoległej pracy zespołów prądotwórczych. Ze względów bezpieczeństwa konieczne jest utrzymywanie określonej nadwyżki mocy, z reguły ok. 20% mocy pojedynczej prądnicy, podczas rejsu [19] lub odpowiednio większej w czasie manewrów. Powoduje to określone konsekwencje ekonomiczne w postaci wzrostu jednostkowego zużycia paliwa przez silnik spalinowy oraz konieczności pracy równoległej zespołów prądotwórczych. Przykładowo, dla masowców Polskiej Żeglugi Morskiej serii B545 o nośności 33600 ton, wybudowanych w latach 1987–1988, wyposażonych w trzy zespoły prądotwórcze o mocy 504 kW każdy, średni czas pracy równoległej wyniósł średnio 22% czasu eksploatacji statku, natomiast czas manewrów nie przekraczał 3% [17]. Jednakże właśnie w czasie manewrów każda awaria systemów związanych z napędem i sterowaniem statkiem niesie znaczne zagrożenie dla jego bezpieczeństwa. W takich warunkach szczególnie istotne staje się zapewnienie ciągłości zasilania w elektroenergetycznej sieci okrętowej.

Konsekwencją nieprawidłowego rozptyłu obciążenia między równoległe pracujące zespoły prądotwórcze jest przede wszystkim pozorne przeciążenie elektrowni okrętowej przy istniejącym jeszcze zapasie mocy. Na skutek przeciążenia prądowego jednej z prądnic, przy niedociążeniu pozostałych, dochodzi do zadziałania układu odłączającego odbiory mniej ważne (układ Mayera), a przy dalszym wzroście obciążenia do automatycznego wyłączenia przeciążonej prądnicy wyłącznikiem głównym. W sytuacji, gdy zapas mocy pozostałych prądnic nie wystarcza do przejścia obciążenia odłączonej prądnicy, dochodzi do zaniku zasilania w całej sieci elektroenergetycznej, co może mieć poważne konsekwencje, związane z bezpieczną eksploatacją statku.

5. POMIARY EKSPLOATACYJNE PARAMETRÓW ELEKTROENERGETYCZNEGO SYSTEMU OKRĘTOWEGO

Funkcjonowanie okrętowego systemu elektroenergetycznego ma podstawowe znaczenie dla bezpiecznej i efektywnej eksploatacji statku. Z tego względu parametry tego systemu podlegają kontroli, opartej na ciągłym prowadzeniu pomiarów eksploatacyjnych i diagnostycznych.

Celem tych pomiarów jest nie tylko zapewnienie warunków bezpiecznego i efektywnego funkcjonowania elektroenergetycznego systemu okrętowego, ale również optymalizacja strategii eksploatacyjnej przy zminimalizowaniu prawdopodobieństwa awarii [12].

Pomiary eksploatacyjne parametrów okrętowego systemu elektroenergetycznego dotyczą zarówno wielkości elektrycznych: napięcia, prądu, mocy i częstotliwości, jak i nieelektrycznych, np. temperatury, ciśnienia, przepływu. Przykładowo, dla zespołów prądowców pomiary te dotyczą głównie parametrów produkowanej energii elektrycznej (napięcie i częstotliwość), parametrów obciążenia prądnicy (prąd i moc) oraz parametrów pracy silnika napędowego prądnicy (temperatury, ciśnienia, przepływu) [13]. W odniesieniu do elektroenergetycznego systemu okrętowego, pomiary eksploatacyjne wykorzystywane są dla potrzeb sterowania ręcznego, bądź automatycznego, związanych z bezpiecznym i efektywnym funkcjonowaniem elektrowni okrętowej. W przypadku sterowania ręcznego wyniki pomiarów eksploatacyjnych odczytywane są bezpośrednio z mierników zainstalowanych w Rozdzielni Główniej i wykorzystywane w układzie regulacji wieloparametrowej, którego podstawowym ogniwem jest człowiek. Natomiast w przypadku sterowania automatycznego wykorzystuje się przetworniki pomiarowe przetwarzające kontrolowane wielkości elektryczne i nieelektryczne na sygnały stałoprądowe o znormalizowanych wartościach napięcia lub prądu, zainstalowane w pętach sterowania automatycznego odpowiednich układów regulacji. W polu prądnicy Rozdzielni Główniej, zależnie od przyjętego rozwiązania, przykładowo mogą znajdować się: przyrządy do pomiaru mocy czynnej i biernej, prądu, częstotliwości i napięcia prądnicy, licznik rzeczywistego czasu pracy prądnicy, aparatura synchronizacyjna i sterownicza [13]. Nadto często kontrolowana jest wartość prądu dużych odbiorników. Jak dotychczas nie są kontrolowane zniekształcenia krzywych napięć i prądów, mające oprócz konsekwencji omówionych w pkt. 4.2, również istotny wpływ na pracę przyrządów pomiarowych. Nie są również rejestrowane chwilowe odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowych, pomimo uwzględnienia tych parametrów w przepisach PRS.

6. PODSUMOWANIE

W niniejszym opracowaniu przedstawiono złożoność problematyki jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach okrętowych. Pogorszenie parametrów opisujących jakość energii elektrycznej, wytwarzanej w tych sieciach, oddziałuje w istotny sposób na funkcjonowanie odbiorników energii elektrycznej i ma znaczący wpływ nie tylko na ekonomiczną eksploatację statku, ale również na jego bezpieczeństwo.

Dalsze prace nad zagadnieniem jakości energii w elektroenergetycznej sieci okrętowej powinny obejmować m.in. opracowanie i wybór odpowiednich wskaźników charakteryzujących tę sieć oraz określenie ich wartości granicznych, na podstawie przyjętych kryteriów. Powinny one wynikać z określenia skutków zanizania wartości wyżej wymienionych wskaźników na pracę okrętowych odbiorników energii elektrycznej, ze szczególnym uwzględnieniem bezpiecznej eksploatacji niewrażliwych sy-

stemów okrętowych. Celem jest również opracowanie propozycji aktów normatywnych, zalecających konieczność ciągłej kontroli wskaźników jakości energii elektrycznej w wybranych punktach elektroenergetycznej sieci okrętowej.

Następnym krokiem winno być przedstawienie konkretnych propozycji odnośnie do metod pomiaru wybranych wskaźników jakości energii w elektroenergetycznych sieciach okrętowych i wskazanie stosownych środków do ich realizacji.

Nadto, należy porównać, z uwzględnieniem kryteriów ekonomicznych, alternatywne rozwiązania, poprawiające jakość energii elektrycznej w rozważanych sieciach (np. kompensacja zakłóceń) oraz przeprowadzić analizę możliwości wprowadzenia odbiorników o podwyższonej odporności na zakłócenia.

LITERATURA

1. Białek R.: *Ekonomiczne wytwarzanie energii elektrycznej na statkach*. V Konferencja Elektrotechniki Okrętowej, Gdynia 1986, 68–78.
2. Cichy M., Kowalski Z.: *Badanie własności dynamicznych układów regulacji częstotliwości okrętowych zespołów prądowców*. Budownictwo Okrętowe, październik 1972, 336–339.
3. Galbas J., Krajczyński Z., Lisowski J.: *Okrętowe stery strumieniowe*. Wyd. I. Wyd. Morskie, Gdańsk 1986.
4. Gónera M.: *Źródła i mechanizmy powstawania zakłóceń w systemach pomiarowych analogowych układów scalonych*. Prace PIE 1995, 124.
5. Hasse L., Karkowski Z., Kołodziejcki J., Konczakowska A., Spiralski L.: *Zakłócenia w aparaturze elektronicznej*. Radioelektronik Sp. z o.o., Warszawa 1995.
6. Katarzyński J.: *Ship power plant operating problems connected with reactive power distribution between electric generators working in parallel*. Polish Maritime Research 1995, 2, 2, 27–30.
7. Koszmider A., Olak J., Piotrowski Z.: *Przekładniki prądowe*. Wyd. I, WNT 1985.
8. Kowalski Z.: *Cechy i parametry jakościowe energii elektrycznej*. JUEE 1995, 1, 1, 7–16.
9. Kowalski Z., Patkowski J., Szeleźniak J.: *Analiza pracy zautomatyzowanej elektrowni na statku Franciszek Zubrzycki*. Budownictwo Okrętowe, grudzień 1974, 498–501.
10. Krępa J.: *Zalety energetyczne okrętowych elektrowni z prądnicami asynchronicznymi*. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska, 1990, 9–10, 63–66.
11. Kuśmirek Z.: *Zastosowanie komputerowych technik pomiarowych do badania jakości energii elektrycznej*. JUEE, 1, 1995, 1, 47–53.
12. Majewski J.: *The diagnostics by portable systems as an alternative for diagnostics by stationary systems*. Polish Maritime Research, December 1995, 2, 4, 29–31.
13. Mindykowski J.: *Pomiary eksploatacyjne i diagnostyczne parametrów elektroenergetycznego systemu okrętowego*. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska, marzec 1994, 24–28.
14. Pytlak A., Zymmer K.: *Kompatybilność elektromagnetyczna przekształtników*. Przegląd Elektrotechniczny, 1995, 9, 234–238.
15. Sawicki J., Galewski M.: *Potrzeba i możliwości zreformowania rozliczeń za energię elektryczną*. Archiwum energetyki 1994, 1–2, 35–46.
16. Sołdek J.: *Automatyzacja statków*. Wyd. I. Wyd. Morskie, Gdańsk 1985.
17. Stępnia A.: *Wybór optymalnej elektrowni na przykładzie masowca o nośności 33 000 ton*. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska 1992, 1, 24–27.
18. Tarasiuk T.: *Wyniki badań eksploatacyjnych na m/s „Zagłębie Starokowe”*, prace nie publikowane Katedry Elektroenergetyki Okrętowej WSM w Gdyni (1993).
19. Wyszowski S.: *Elektrotechnika okrętowa*. Wyd. I. Tom I. Wyd. Morskie, Gdańsk 1991.
20. PN 72/E06000. *Maszyny elektryczne wirujące. Ogólne wymagania i badania*
21. *Poradnik Inżyniera Elektryka*. Wyd. I Tom III. WNT, Warszawa 1996.
22. *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich*. PRS, Gdańsk 1996.



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 Sytemów 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.