

JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ A EKONOMICZNA EKSPLOATACJA OKRĘTOWYCH SYSTEMÓW TECHNICZNYCH

The Influence of Electrical Power Quality on the Economic Exploitation Technical Systems of Ships

Janusz MINDYKOWSKI, Tomasz TARASIUK

Wyższa Szkoła Morska w Gdyni

Streszczenie: W artykule podano podstawowe informacje, dotyczące problematyki jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznym systemie okrętowym. Wskazano wybrane parametry jakości energii elektrycznej, istotne z punktu widzenia bezpiecznej eksploatacji okrętowych systemów technicznych. W pracy zostały rozważone takie czynniki, jak: zniekształcenia przebiegów napięcia, odchylenia napięcia i częstotliwości od ich wartości znamionowych, niesymetria napięć oraz nierównomierny rozptył obciążeń czynnych i biernych między pracujące równoległe zespoły prądotwórcze. Ze względu na dominujący udział transportu morskiego w międzynarodowej wymianie towarowej, szerzej przeanalizowano wpływ długotrwałego zaniżania powyższych parametrów na ekonomiczną eksploatację okrętowych systemów technicznych. W podsumowaniu naszkicowano kierunki dalszych prac, mających na celu poprawę efektywności eksploatacji statku, w kontekście wpływu jakości energii elektrycznej na funkcjonowanie okrętowego systemu elektroenergetycznego.

Summary: Basic information concerning the quality of electrical energy in electrical power systems of ships is presented in this article. Selected parameters of electrical energy quality important for the safe operation of technical systems of ships have been mentioned. Such factors as voltage distortion, voltage and frequency deviation from their nominal values, asymmetric voltage and disproportionate distribution of active and reactive loads between parallelly working generating sets are examined. Taking into consideration the predominant role of sea transport in international goods exchange, the influence of prolonged lowering of the above mentioned parameters on the economic operation of technical systems of ships has been analysed. Directions of further work to be undertaken to improve the effectiveness of ship operation as the aspect of influence of electrical energy on electrical power systems of ships have been pointed out.

1. WPROWADZENIE

Transport morski stanowi istotne ogniwo w łańcuchu międzynarodowej wymiany towarowej, a związane z nim koszty mają niemały udział w końcowej cenie produktu. Środkiem służącym wymianie towarowej drogą morską jest statek handlowy, będący jednocześnie złożonym obiektem technicznym, który strukturalnie można podzielić na trzy systemy: nawigacyjny, przeładunkowy i energetyczny. Elektroenergetyczny system okrętowy jest częścią systemu energetycznego, a odpowiednia jakość wytwarzanej, przesyłanej i użytkowanej energii elektrycznej jest podstawowym warunkiem poprawnej pracy wszystkich okrętowych systemów technicznych. Wobec tego jakość

energii elektrycznej w rozważanym systemie powinna być rozpatrywana głównie w aspekcie bezpieczeństwa pracy okrętowych systemów technicznych. Niemal każda awaria systemów okrętowych, takich jak: napędowy, czy nawigacyjny pociąga ze sobą ryzyko katastrofy morskiej, a tym samym stanowi zagrożenie dla życia ludzkiego i niejednokrotnie dla środowiska naturalnego. Każda awaria ma również wymiar ekonomiczny, stąd też podniesienie poziomu bezpieczeństwa żegluga ma istotny wpływ na zmniejszenie całkowitych kosztów transportu morskiego. Jednakże skutki ekonomiczne awarii systemów okrętowych, w odniesieniu do określonego horyzontu czasowego, są trudne do oszacowania, ponieważ zależą w znacznym stopniu od nieprzewidywalnych czynników

zewnątrznych, np. od stanu morza, czy też od warunków pracy statku (jazda w marszu, manewry, postój w porcie, prace przeładunkowe).

Na bezpieczeństwo pracy okrętowych systemów technicznych największy wpływ ma chwilowe, znaczne pogorszenie się jakości energii elektrycznej, natomiast długotrwałe pogorszenie jakości energii elektrycznej niesie ze sobą przede wszystkim skutki ekonomiczne. W tym miejscu należy zaznaczyć, że długotrwałe pogorszenie jakości energii elektrycznej może również przyczyniać się do istotnego obniżenia poziomu bezpieczeństwa pracy okrętowych systemów technicznych przez zmniejszenie trwałości, a więc również niezawodności ważnych elementów tych systemów. W celu wyeliminowania tego wpływu konieczne jest zwiększenie nakładów pracy na obsługę systemów okrętowych, co w sposób oczywisty przyczynia się do zwiększenia kosztów załogowych eksploatacji statków.

W pracy skoncentrowano się przede wszystkim na takich skutkach długotrwałego pogorszenia jakości energii elektrycznej jak: dodatkowe straty energetyczne oraz zmniejszenie trwałości najczęściej występujących elementów wyposażenia statku: maszyn elektrycznych oraz elementów związanych z techniką świetlną, tj. oświetleniowych i sygnalizacyjnych.

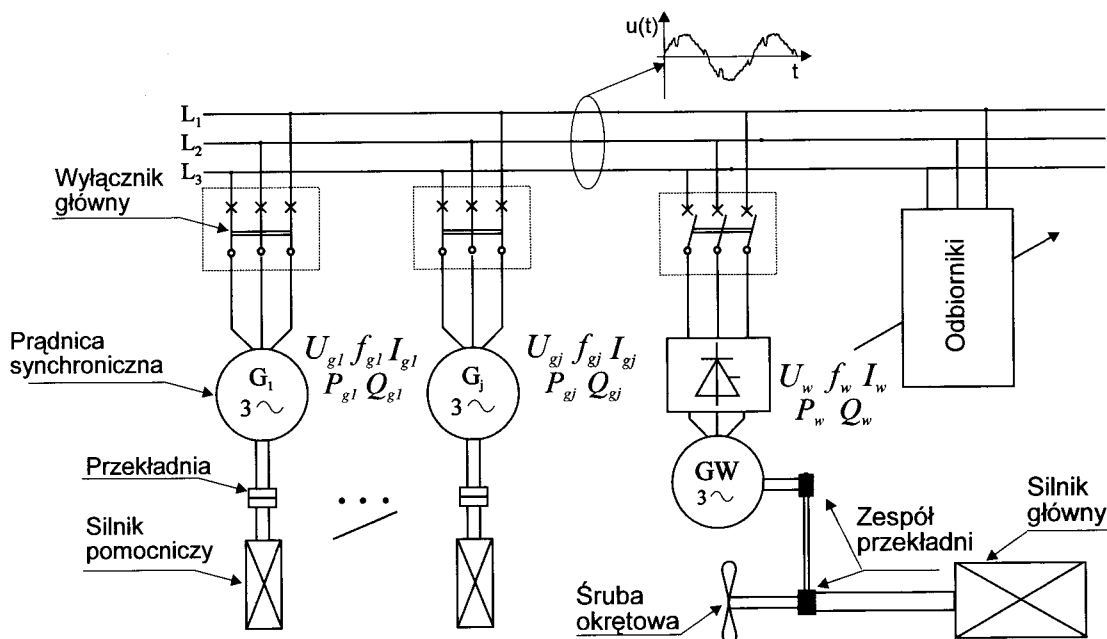
2. JAKOŚĆ ENERGII W OKRĘTOWYM SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

Podstawowym źródłem energii elektrycznej na statkach są trójfazowe prądnice synchroniczne, napędzane pomocniczymi 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 sil-

ników 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 (rys. 1). Stosuje się również dodatkowe turbiny spalinowe mocy zwrotnej, mogące współpracować z prądnicą wałową, turboprądnicą lub wolno stojącym zespołem prądotwórczym [5]. Rozwiązaniem interesującym ze względów ekonomicznych może być wykorzystanie w elektrowni okrętowej prądnic asynchronicznych [3].

Należy jednak 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 okrętowej.

O jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznym systemie okrętowym decydują: odpowiedni poziom napięcia, odpowiednia częstotliwość, nieodkształcona krzywa napięcia zasilającego i symetria napięć zasilających, a także niski poziom zakłóceń radioelektrycznych i proporcjonalny rozptył obciążeń czynnych i biernych w czasie pracy równoległej zespołów prądotwórczych. Konieczność równoległej pracy co najmniej dwóch zespołów prądotwórczych występuje w okresach przewidywanego zwiększonego zapotrzebowania na energię i jest elementem charakterystycznym dla okrętowej sieci elektroenergetycznej. Powoduje to konieczność regulacji rozptyłu mocy czynnej i biernej pomiędzy współpracującymi prądnicami. Nieproporcjonalny rozptył mocy może spowodować pozorne przeciążenie elektrowni okrętowej, a w konsekwencji odłączenie odbiorów mniej ważnych lub nawet zanik zasilania w elektroenergetycznej sieci okrętowej, tzw. „blackout” [5].



Rys. 1. Przykładowy schemat elektroenergetycznego trójfazowego systemu okrętowego z prądnicą wałową

Elektroenergetyczna sieć okrętowa jest siecią elastyczną. Charakteryzuje się ona 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. W związku z tym towarzystwa klasyfikacyjne stawiają szczególne wymagania urządzeniom elektrycznym instalowanym w elektroenergetycznym systemie okrętowym. Przykładowo, Polski Rejestr Statków wymaga, aby urządzenia elektryczne instalowane na statku pracowały prawidłowo przy odchyleniach napięcia i częstotliwości od ich wartości znamionowych podanych w tabeli 1 [9].

Tabela 1. Graniczne odchylenia napięcia i częstotliwości w elektroenergetycznym systemie okrętowym

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

Nadto, Polski Rejestr Statków stawia odpowiednie wymagania co do poziomu dopuszczalnych zniekształceń napięcia zasilającego oraz zakłóceń radioelektrycznych. Zaważalny jest natomiast brak wymagań dotyczących symetrii napięcia zasilającego; nie przewidziano także konieczności bieżącej kontroli odchylenia wielu istotnych parametrów jakości energii elektrycznej od wartości nominalnych, mimo zdefiniowania ich dopuszczalnych wartości w odnośnych przepisach. A przecież jakość rozważanej energii zmienia się w czasie eksploatacji statku, m.in. na skutek zmian charakterystyk elementów elektroenergetycznego systemu okrętowego, np. filtrów harmonicznych, oraz jego modyfikacji i rozbudowy. Reasumując, założenia projektowe dotyczące budowy statku w czasie wieloletniej eksploatacji rozważanego systemu mogą stać się nieaktualne.

3. JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ A EKONOMICZNA EKSPLOATACJA STATKU

3.1 Odchylenia napięcia i częstotliwości

Istotnym zagadnieniem jest wpływ wahań napięcia i częstotliwości na pracę silników elektrycznych oraz źródeł światła. W przypadku tego rodzaju odbiorników energii elektrycznej istotne są nawet niewielkie dodatkowe straty energetyczne lub spadek trwałości rozważanych elementów, ze względu na znaczną liczbę takich odbiorników na statku.

Odchylenia napięcia od wartości znamionowej powodują wzrost strat całkowitych w silniku indukcyjnym,

zmienia się również jego prędkość obrotowa. Warto dodać, że wpływ odchylenia napięcia i częstotliwości na pracę silników elektrycznych uwidacznia się dopiero w dłuższym okresie. Ze względu na niezależne układy regulacji napięcia i częstotliwości, stosowane w systemach okrętowych, a także na znaczne dopuszczalne odchylenia tych wielkości od ich wartości nominalnych, w rozważanych systemach w sposób istotny zmienia się stosunek napięcia do częstotliwości. Nie pozostaje to bez wpływu na wartość strumienia magnetycznego w obwodach magnetycznych maszyn i aparatów elektrycznych, a tym samym na optymalne warunki ich pracy. Skutkiem tego może być wzrost strat całkowitych, powodujących 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 kilkadziesiąt procent. Dla silników indukcyjnych obniżenie napięcia o 10% jego wartości znamionowej powoduje dodatkowy przyrost temperatury przy obciążeniu znamionowym o $+6^{\circ}\text{C} \dots +7^{\circ}\text{C}$ [11]. Nie bez znaczenia są również dodatkowe straty (oraz spadki napięć) na rezystancjach kabli łączeniowych, spowodowane zwiększeniem prądów pobieranych przez silniki. W przypadku aparatów elektrycznych zasilanych napięciem przemiennym zmiana stosunku napięcia do częstotliwości może powodować zmniejszenie trwałości łączeniowej łączników z napędem elektrycznym. Jest to spowodowane istotnymi zmianami siły przyciągania zwory, która w najogólniejszym przypadku, w stanie statycznym, jest proporcjonalna do kwadratu tego stosunku [1].

Oddzielnym zagadnieniem jest zmiana prędkości obrotowej silników elektrycznych spowodowana zmianą częstotliwości w elektroenergetycznym systemie okrętowym. Wzrost prędkości obrotowej silnika napędowego w stosunkowo długim czasie powoduje przyspieszone zużycie elementów mechanicznych (łożyska, łożki sprężarek itp.). Natomiast spadek prędkości obrotowej oznacza spadek przepływu mediów w okrętowych systemach chłodzenia i smarowania, mający wpływ na trwałość mechanizmów okrętowych, jednocześnie pogarsza się sprawność pomp wirowych. Nadto, przy obniżeniu prędkości obrotowej pogarsza się chłodzenie silników elektrycznych, powodujące dodatkowy przyrost temperatury izolacji.

Wpływ odchylenia napięcia na źródła światła zależy od charakteru tych odchylenia oraz rodzaju analizowanego elementu świetlnego. Do najczęściej stosowanych na statkach źródeł światła należą żarówki i świetlówki. Ich ekonomiczna eksploatacja ma istotne znaczenie, zarówno ze względu na dużą liczbę punktów świetlnych zainstalowanych na statku, jak i fakt, że znaczna ich część jest przewidziana do oświetlenia siłowni, korytarzy i pomieszczeń technicznych, a więc pracuje w sposób ciągły. Przykładowo, zestawienie liczby żarówek i świetlówek zainstalowanych na statku typu Con-Ro m/s „Inowrocław” pokazano w tabeli 2 [2].

Tabela 2. Zestawienie liczby żarówek i świetlówek na m/s „Inowrocław”

Rodzaj	Moc [W]	Liczba sztuk
Świetlóvky	40	380
	20	748
Żarówki	60	230
	40	222

W przypadku żarówek decydujące znaczenie na ich ekonomiczną eksploatację mają odchylenia napięcia od jego wartości znamionowej. Dla typowych żarówek jako dopuszczalne przyjmuje się zmiany napięcia zasilającego od -8% do $+6\%$ wartości napięcia znamionowego [11], co w przybliżeniu odpowiada granicznym długotrwałym odchyleniom napięcia w elektroenergetycznym systemie okrętowym, przedstawionym w tabeli 1. Jednak różny jest wpływ zarówno obniżenia napięcia, jak i jego podwyższenia na pracę żarówek. W przypadku obniżenia napięcia w sposób istotny maleje strumień świetlny, co wpływa nie tylko na bezpieczeństwo pracy załogi, ale w przypadku lamp nawigacyjnych również na bezpieczeństwo statku. Na podkreślenie zasługuje istotne obniżenie skuteczności świetlnej (rozumianej jako stosunek strumienia świetlnego i mocy pobieranej przez źródło światła), które przy obniżeniu napięcia o 8% wartości napięcia znamionowego wynosi ok. 20% . Natomiast wzrost napięcia powoduje przede wszystkim istotne obniżenie trwałości żarówek, które przy wzroście napięcia o 6% napięcia znamionowego może być niemal czterokrotne [11]. To istotne obniżenie trwałości, w połączeniu ze znaczną liczbą rozważanych elementów, jak również z faktem, że duża ich część jest przewidziana do pracy ciągłej, ma ważny wymiar ekonomiczny, pomimo małej ceny jednostkowej żarówki. Cena ta zależy od miejsca zakupu, a więc ściśle wiąże się z rejonem pływania statku (utrzymywanie na statku znacznej nadwyżki zapasowych elementów oświetleniowych nie znajduje wystarczającego uzasadnienia). Warto podkreślić fakt występowania na statku dużej liczby żarówek sygnalizacyjnych małej mocy, rzędu kilku watów. Ich liczba może być zbliżona do liczby żarówek oświetleniowych.

Trwałość drugiego istotnego elementu świetlnego, czyli świetlówek instalowanych na statkach, zależy w znacznym stopniu, oprócz długotrwałych odchylen napięcia, od innych czynników zewnętrznych. Największe znaczenie ma tutaj głębokość i częstotliwość przysiadów napięcia, typowych dla elektroenergetycznego systemu okrętowego oraz częstość włączania i wyłączania świetlówek. Głębokie przysiadki napięcia (aż do zaniku włącznic) w elektroenergetycznym systemie okrętowym mają charakter losowy i niejednokrotnie są spowodowane stanami awaryjnymi elementów systemu. Wpływ przysiadki napięcia na pracujące świetlóvky zależy od dotychczasowego czasu działania świetlóvky i powoduje wyeliminowanie dłużej eksploatowanych świetlówek.

Wpływ pogorszenia się jakości energii elektrycznej na ekonomiczną eksploatację okrętowych elementów oświetleniowych i sygnalizacyjnych wiąże się również z koniecznością zwiększenia nakładu pracy potrzebnego do wy-

miany uszkodzonych źródeł światła. Czas potrzebny do tej wymiany zależy głównie od rodzaju i wielkości statku i przeciętnie wynosi ok. jednej godziny dziennie, przy zaangażowaniu jednej osoby.

W prezentowanej analizie pominięto inne stosowane na statkach źródła światła, takie jak: żarówki halogenowe oraz lampy sodowe i rtęciowe. Są one stosowane głównie do oświetlenia pokładów otwartych, a więc są użytkowane jedynie w czasie postoju w porcie lub na redzie. Jeżeli ponadto uwzględnimy fakt, że moc zainstalowanych źródeł światła tego typu jest znacznie mniejsza od mocy wszystkich zainstalowanych źródeł światła (przykładowo dla statku m/s „Inowrocław” stanowi to 32% mocy wszystkich źródeł światła [2]), to można przyjąć, że wzrost kosztów ich eksploatacji, wynikający z pogorszenia się jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznym systemie okrętowym jest pomijalnie mały.

3.2 Zniekształcenia i asymetria napięcia zasilającego

Współczesne elektroenergetyczne systemy okrętowe charakteryzują się występowaniem prądów odkształconych, które w sposób istotny zniekształcają napięcie na szynach głównych rozdzielnic okrętowych. Zniekształcenia te można opisać za pomocą współczynnika zniekształceń sygnału (1):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} A_h^2}}{A_{rms}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

- A_h — wartość skuteczna h -tej harmonicznej;
- A_{rms} — wartość skuteczna sygnału.

Współczynnik zniekształceń napięcia w elektroenergetycznych systemach okrętowych często przekracza 5% , a nierzadko nawet 20% [6].

Zniekształcenia krzywej napięcia zasilającego mają negatywny wpływ na pracę niemal wszystkich odbiorników energii elektrycznej. Ze względów bezpieczeństwa należy zwłaszcza uwzględnić ich wpływ na pracę urządzeń radiowych i radio- oraz elektronawigacyjnych, a także elektronicznych układów automatyki. Zakłócenia tego typu łatwo przenoszą się przez sieć kablową, co powoduje konieczność ochrony tych urządzeń przez stosowanie filtrów lub przetwornic elektromaszynowych. Należy również wspomnieć o wpływie zniekształceń przebiegu prądu na pracę układów pomiarowych, ze względu na powszechne wykorzystywanie do tych celów przekładników prądowych. Nadto, zniekształcenia krzywych napięcia i prądu będą miały negatywny wpływ na pracę regulatorów napięcia prądnic okrętowych, zwiększając odchyłki napięcia [5].

Ze względów ekonomicznych należy przede wszystkim uwzględnić dodatkowe straty energetyczne spowodowane wyższymi harmonicznymi w napięciu zasilającym. Podstawowe znaczenie mają tutaj dodatkowe straty w żelazie w obwodach magnetycznych oraz straty energetyczne w kondensatorach służących do poprawy współczynnika mocy, np. w oprawach świetlówkowych [6]. W przypadku znacznej zawartości wyższych harmonicznych w na-

pięciu mogą one przewyższać korzyści wynikające z tego rodzaju korekcji. Straty energetyczne w żelazie spowodowane przemagnesowaniem strumieniem odkształconym można zapisać w uproszczonej postaci (2) [8]:

$$P_{Fe} \approx P_{Fel} \cdot \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{\frac{f_1}{f_h}} \cdot \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2 \quad (2)$$

gdzie:

- P_{Fel} — straty w żelazie dla podstawowej harmonicznej;
- U_1 — napięcie podstawowej harmonicznej;
- U_h — napięcie h -tej harmonicznej;
- f_1 — częstotliwość podstawowej harmonicznej;
- f_h — częstotliwość h -tej harmonicznej.

Praktycznie w elektroenergetycznym systemie okrętowym należy liczyć się z kilkuprocentowym wzrostem strat w żelazie.

Innym zagadnieniem jest wpływ niesymetrii napięcia zasilającego na pracę silników indukcyjnych. Jednym ze wskaźników opisujących tę niesymetrię jest współczynnik niesymetrii napięciowej w_n określony jako stosunek największej odchyłki napięcia u dowolnej fazy od średniej wartości U_{sr} napięcia do średniej wartości napięcia [4]:

$$w_n = \frac{\Delta u}{U_{sr}} \quad (3)$$

Zgodnie z ustaleniami Międzynarodowej Komisji Elektrotechniki (IEC Report 892/1987), jeżeli niesymetria napięciowa przekracza 5%, należy przeanalizować pracę silnika elektrycznego z uwzględnieniem składowej przeciwnej napięcia. Przy mniejszych niesymetriach napięciowych zalecane jest ograniczenie obciążenia w stopniu zależnym od tej niesymetrii [10].

W ogólnym przypadku silniki zasilane są napięciem odkształconym, niesymetrycznym, o znacznie zmieniającej się częstotliwości i wartości skutecznej napięcia, co powoduje sumowanie się różnego rodzaju dodatkowych strat energetycznych. Większość silników indukcyjnych w elektroenergetycznych systemach okrętowych pracuje przy stałym obciążeniu i jedynym środkiem poprawiającym ich trwałość jest zwiększenie ich mocy znamionowej w stosunku do mocy zapotrzebowanej. Istnieje zatem konieczność opracowania nowych metod doboru silników elektrycznych do przewidywanej mocy zapotrzebowanej w warunkach okrętowych, tzn. przy znacznych odchyleniach napięcia i częstotliwości od ich wartości nominalnych, oraz przy znacznych zniekształceniach i asymetrii napięcia zasilającego, oddziałujących na silniki jednocześnie. Powoduje to kumulowanie się dodatkowych strat energetycznych, a tym samym większe przyrosty temperatury niż wynikałoby to z analiz cząstkowych.

3.3 Nieproporcjonalny rozptył obciążeń

W elektrowniach okrętowych często występuje konieczność równoległej pracy wolno stojących zespołów prądowców. Powoduje to określone konsekwencje ekonomiczne w postaci wzrostu jednostkowego zużycia paliwa przez silnik spalinowy oraz konieczności pracy równoległej zespołów prądowców [5]. Przykładowo,

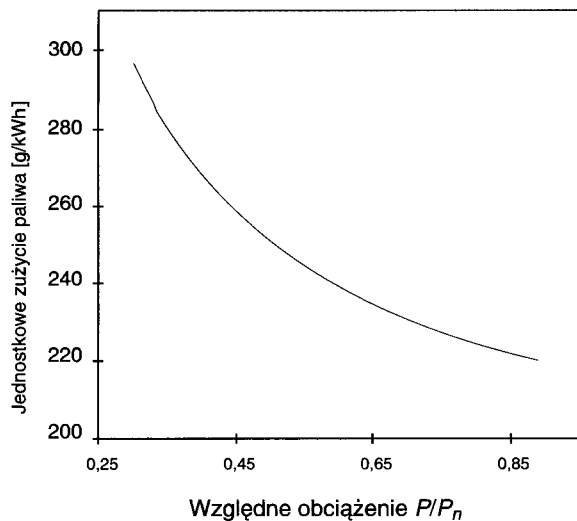
dla masowców Polskiej Żeglugi Morskiej, serii B545, o nośności 33600 ton, wybudowanych w latach 1987-1988, wyposażonych w trzy zespoły prądowców, o mocy 504 kW każdy, średni czas pracy równoległej wyniósł 22% czasu eksploatacji statku, natomiast czas manewrów nie przekraczał 3% [7]. Znaczenie proporcjonalnego rozptyłu obciążeń jest bardzo istotne właśnie w czasie manewrów statku oraz w trudnych warunkach pogodowych i nawigacyjnych. Konsekwencją nieprawidłowego rozptyłu obciążeń między równoległe pracujące zespoły prądowców 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 wyłącznikiem głównym przeciążonej prądnicy. 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].

W pozostałym okresie pracy równoległej zespołów prądowców, poza manewrami i trudnymi warunkami żeglugowymi, decydujące znaczenie ma aspekt ekonomiczny rozpatrywanego zagadnienia. Z tego punktu widzenia bardziej istotny wydaje się proporcjonalny rozptył mocy czynnych. Dodatkowe straty energetyczne, spowodowane nieproporcjonalnym rozptyłem mocy biernych, ze względu na nieduże rezystancje uzwojeń prądnic okrętowych i niewielkie długości kabli łączących poszczególne prądnice z szynami głównymi rozdzielnicy głównej, są pomijalnie małe. Przykładowo, zgodnie z przepisami klasyfikacji i budowy statków morskich Polskiego Rejestru Statków, obciążenie czynne każdego z zespołów prądowców, 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 równoległe lub o 25% znamionowej mocy czynnej rozpatrywanej prądnicy — w zależności od tego, która z tych wartości jest mniejsza [9]. W związku z tym współczynnik charakteryzujący rozptył mocy czynnej między pracujące równoległe prądnice można zdefiniować w postaci (4) [4]:

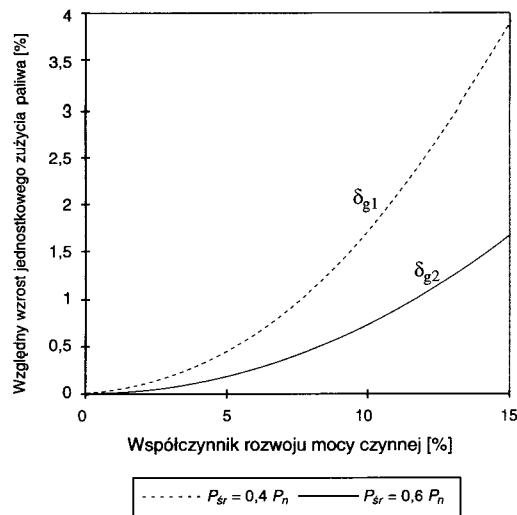
$$\delta P_i = \frac{P_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^n P_m}{P_m} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:

- P_i — obciążenie czynne i -tej prądnicy;
- P_m — znamionowe obciążenie czynne prądnicy o największej mocy pracującej równoległe lub znamionowe obciążenie czynne rozpatrywanej prądnicy, jeżeli jej znamionowe obciążenie czynne jest mniejsze niż 0,6 znamionowego obciążenia czynnego prądnicy o największej mocy pracującej równoległe;



Rys. 2. Jednostkowe zużycie paliwa w zależności od obciążenia silnika spaliniowego 6AL25/30 o mocy 760 kW



Rys. 3. Względny wzrost średniego jednostkowego zużycia paliwa przy wzroście współczynnika rozptyłu obciążenia czynnego

- n — liczba pracujących równolegle prądnic;
- α_i — współczynnik proporcjonalności zależny od liczby i mocy współpracujących zespołów prądotwórczych ($\alpha_i = 0,5$ dla $n = 2$ i równych mocy współpracujących zespołów).

Wpływ proporcjonalnego rozptyłu mocy czynnych między równolegle pracujące zespoły prądotwórcze jest szczególnie ważny w przypadku niewielkich obciążeń spaliniowych silników napędowych. Jest to o tyle istotne, że ze względów bezpieczeństwa często utrzymywana jest znaczna nadwyżka mocy elektrowni okrętowej i silniki pomocnicze w czasie pracy równoległej są obciążone mocą niekiedy znacznie mniejszą od połowy swojej mocy znamionowej. Na rysunku 2 przedstawiono jednostkowe zużycie paliwa silnika spaliniowego 6AL25/30 stosowanego powszechnie w polskiej flocie do napędu prądnic okrętowych, przy zmianach obciążenia w zakresie 0,3...0,9 obciążenia znamionowego dla stałej prędkości obrotowej 750 obr/min.

Zależność powyższą uzyskano za pomocą aproksymacji średniokwadratowej wyników pomiarów [3] wielomianem czwartego rzędu, o współczynnikach odpowiednio równych: $a = 479$; $b = -1436$; $c = 1717$; $d = 1024$; $e = 484$:

$$g = a \cdot \left(\frac{P}{P_n}\right)^4 + b \cdot \left(\frac{P}{P_n}\right)^3 + c \cdot \left(\frac{P}{P_n}\right)^2 + d \cdot \left(\frac{P}{P_n}\right) + e \quad (5)$$

gdzie:

- g — jednostkowe zużycie paliwa [g/kWh];
- (P/P_n) — względne obciążenie silnika spaliniowego.

Nieproporcjonalny rozptył obciążeń między równolegle pracujące zespoły prądotwórcze powoduje wzrost średniego jednostkowego zużycia paliwa w stosunku do obciążeń proporcjonalnych. Nadto, ze względów bezpieczeństwa, konieczne jest utrzymywanie określonej nadwyżki mocy, z reguły ok. 20% mocy pojedynczej prądnicy, podczas odbywania rejsu [5], co powoduje

konieczność długotrwałej eksploatacji zespołów prądotwórczych przy obciążeniach nierzadko zbliżonych do 40% obciążenia nominalnego lub niejednokrotnie niższych w czasie manewrów.

W celu oszacowania wpływu nieproporcjonalnego rozptyłu obciążeń czynnych na wzrost jednostkowego zużycia paliwa, przeanalizowano dwa przypadki pracy równoległej dwóch zespołów prądotwórczych napędzanych silnikami spaliniowymi i obciążonych średnio mocą czynną równą 40% i 60% mocy czynnej znamionowej P_m (krzywe δ_{g1} i δ_{g2} na rysunku 3, odpowiednio) przy zmianach współczynnika (4) w zakresie 0...15%. Dla uproszczenia w analizie pominięto sprawność prądnicy.

W przypadku najczęściej stosowanych hydrauliczno-mechanicznych regulatorów prędkości obrotowej oraz metody charakterystyk statycznych rozdziału obciążenia (szerzej omówionej w [5]) dokładność rozdziału obciążeń jest rzędu 7%. Dla takiej nierównomierności rozptyłu obciążeń czynnych i obciążeniu średnim pojedynczego zespołu równym 40% obciążenia znamionowego jednostkowe zużycie paliwa wzrasta o 0,85%. A więc ewentualne straty energetyczne nie są nazbyt wielkie, jednak jak, wynika z rysunku 2, rosną wykładniczo przy wzroście współczynnika nierównomierności rozptyłu oraz przy zmniejszaniu średniego obciążenia zespołu. Ponadto, należy brać pod uwagę fakt, że w okresie eksploatacji statku, wynoszącym nierzadko ponad dwadzieścia lat, straty te mogą być większe od kosztów dodatkowych układów poprawiających współczynnik rozptyłu mocy czynnej w elektroenergetycznym systemie okrętowym.

4. PODSUMOWANIE

Szeroko rozumiane pogorszenie się jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznym systemie okrętowym w sposób znaczący przyczynia się do wzrostu kosztów transportu morskiego. Oprócz zmniejszenia się bezpieczeństwa pracy statku, nie bez znaczenia są dodatkowe koszty wynikające z pogorszenia jakości energii elektrycznej. Koszty te wynikają przede wszystkim z określo-

nych strat energetycznych oraz częstszych przeglądów i napraw, związanych z obniżeniem trwałości wyposażenia okrętowego. Suma omawianych kosztów może przyjmować istotne wartości, a ich bezpośredni związek z jakością energii elektrycznej skłania do rozważenia dodatkowych nakładów inwestycyjnych, mających na celu jej poprawę w elektroenergetycznym systemie okrętowym. Nadto, efektem uzyskanego wzrostu bezpieczeństwa pracy statku może być obniżenie stawek ubezpieczeniowych przez okrętowe towarzystwa asekuracyjne.

Warto podkreślić konieczność bieżącej kontroli jakości energii, która powinna dostarczyć istotnych informacji diagnostycznych co do rozważanego systemu. Umożliwią one stwierdzenie stanów niesprawności ważnych elementów systemu, takich jak: regulatory napięcia i częstotliwości, filtry harmonicznych oraz duże odbiorniki energii, a także podjęcie odpowiednich zabiegów naprawczych przed wystąpieniem awarii elektroenergetycznego systemu okrętowego.

5. LITERATURA

1. Au A., Maksymiuk J., Pochanke Z.: *Podstawy obliczeń aparatów elektroenergetycznych*. WNT, Warszawa 1982, 252–255.
2. Drzazgowski Z.: *Trwałość oświetlenia elektrycznego na statku INOWROCLAW*. Bud. Okręt. 1989, 2, 27–29.
3. Krępa J.: *Zalety energetyczne okrętowych elektrowni z prądnicami asynchronicznymi*. Bud. Okręt. i Gosp. Mors. 1990, 9–10, 63–66.
4. Mindykowski J., Tarasiuk T.: *Quality factors of electrical power and their measurements under ships conditions*. XIV IMEKO WORLD CONGRESS, Tampere 1997, IVb, 19–24
5. Mindykowski J., Tarasiuk T.: *Zagadnienie jakości wytwarzania i użytkowania energii elektrycznej w okrętowym systemie elektroenergetycznym*. JUEE, 1996, II, 2, 1996, 71–81.
6. Reinecke H., Schild W.: *Harmonics in main electric supply systems with semiconductor rectifiers and subsequent methods of compensation*. IMECE'91, Shanghai, 1991, 1–10.
7. Stępnia A.: *Wybór optymalnej elektrowni na przykładzie masowca o nośności 33 000 ton*. Bud. Okręt. i Gosp. Mors. 1992, 1, 24–27.
8. Zakrzewski K.: *Współczynnik wzrostu strat w blachach prądnicowych przy przemagnesowaniu osiowym strumieniem odkształconym*. Sympozjum PPEE'97 Ustroń, 17–20 marca 1997, 163–165.
9. Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich. Polish Register of Shipping. Gdańsk 1995.

10. *Poradnik inżyniera elektryka*. Wyd. I. Tom II. WNT, Warszawa 1995, 447–448.

11. *Poradnik inżyniera elektryka*. Wyd. I. Tom III. WNT, Warszawa 1996, 351–353.



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 „Follow” 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. Wydziale Elektrycznym Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni w 1989 r. Po ukończeniu studiów rozpoczął pracę w Polskiej Żegludzie 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. Posiada dyplom oficera elektryka okrętowego.