

## Dlaczego problem jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych zasługuje na szczególną uwagę?

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono krótką charakterystykę okrętowego systemu elektroenergetycznego. Podkreślono istotność związków między jakością energii elektrycznej wytwarzanej i użytkowanej w rozważanym systemie, a ryzykiem katastrofy morskiej. Zwrócono uwagę na zagrożenie życia ludzkiego i środowiska naturalnego, a także wymierne straty ekonomiczne, będące pochodną zanizonej jakości energii elektrycznej. Przedstawiono zagadnienie estymacji jakości energii elektrycznej jako klucz do jej poprawy.

**Abstract.** A short characteristic of the ship electrical power system has been presented. The strong relationships between a quality of electrical power produced and utilized in the system under consideration and a risk of sea disaster have been underlined. A special attention on hazard of human life and natural environment as well as concrete economical losses resulting from electrical power quality deterioration has been paid. A problem of electrical power quality assessment as the key point for its improvement has been presented. (Why does the electrical power quality problem in ship's systems deserve special attention?).

**Słowa kluczowe:** jakość energii elektrycznej, elektroenergetyczne systemy okrętowe, ryzyko katastrofy morskiej, przepisy towarzystw klasyfikacyjnych.

**Keywords:** electrical power quality, ship power systems, risk of sea disaster, classification society rules

### Wstęp

Okrętowe systemy elektroenergetyczne należą do grupy tzw. autonomicznych systemów elektroenergetycznych, między innymi określanej mianem „isolated power systems” [1]. Oprócz systemów okrętowych, w jej skład wchodzi systemy: statków powietrznych, platform wiertniczych, małych wysp, zakładów przemysłowych o sezonowym charakterze pracy, czy też awaryjne systemy banków, szpitali, centrów handlowych i wysokich budynków [1], [2]. Cechy charakterystyczne tego rodzaju systemów to: ograniczona, niewielka liczba źródeł energii, niespotykany w innych przypadkach stosunek mocy pojedynczego odbiornika do źródła energii elektrycznej [3], [4] oraz relatywnie duża wartość impedancji zwarcia prądnic instalowanych w tych systemach [1], [5]. W efekcie zaburzenia elektromagnetyczne, (a zwłaszcza wywołane nimi zmiany częstotliwości oraz zniekształcenia prądów i napięć) w autonomicznych systemach elektroenergetycznych znacznie przekraczają swoim poziomem zaburzenia w dużych, połączonych systemach elektroenergetyki lądowej, obserwowane w czasie ich normalnej eksploatacji. Należy podkreślić wzrost zainteresowania tego rodzaju systemami na świecie, udokumentowany rosnącą liczbą publikacji na ich temat [1], [2], [4], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]. Również w informacji elektronicznej przesłanej w tym roku do członków Power Engineering Society IEEE systemy takie, (określane mianem „finite inertia power systems”), są wymieniane jako jedna z głównych dziedzin zainteresowania środowiska inżynierów związanych z elektroenergetyką.

Co jednak sprawia, że okrętowy system elektroenergetyczny powinien być traktowany ze szczególną uwagą? Odpowiedź jest prosta: jest on zainstalowany na obiekcie ruchomym - statku, i posiada decydujący wpływ na jego funkcjonowanie. Natomiast statek, zwłaszcza przewożący ładunki niebezpieczne, w przypadku awarii stanowi potencjalne (zmienne w czasie i przestrzeni) zagrożenie dla ludzi i środowiska naturalnego.

W związku z tym konsekwencje błędnej obsługi, niepoprawnego funkcjonowania lub awarii rozważanych systemów mogą znacznie wykraczać poza strefę samego statku. Zaś skutki katastrof okrętowych, zwłaszcza tankowców, są aż nazbyt dobrze znane z doniesień mediów.

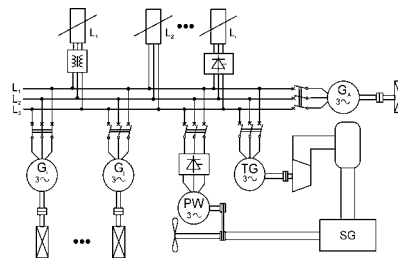
Waga rozważanego problemu wzrasta, jeżeli dodamy, iż istotną część, tj.  $340 \times 10^6$  dwt (deadweight tonnage) całkowitego tonażu handlowej floty światowej, szacowanego na  $800 \times 10^6$  dwt [16], stanowi tonaż tankowców, a więc statków podwyższonego ryzyka, ze względu na konsekwencje wynikające z potencjalnego zagrożenia środowiska naturalnego w przypadku awarii lub katastrofy.

### Charakterystyka okrętowego systemu elektroenergetycznego

Na okrętowy system elektroenergetyczny składają się zarówno urządzenia służące do wytwarzania energii elektrycznej, urządzenia do przesyłu i rozdzielenia wytwarzanej energii, jak i jej odbiorniki. Podstawowe elementy składowe okrętowego systemu elektroenergetycznego (rys.1) stanowią [3], [4]:

- źródła energii – w podstawowej konfiguracji stosowane są zwykle trzy zespoły prądotwórcze diesel-generator oraz agregat awaryjny, a czasami instalowane są również prądnice wałowe, czy też turboprądnice;
- rozdzielnica główna i awaryjna wraz z układami zabezpieczeń, wyłącznikami oraz szynami głównymi i układami pomiarowymi;
- sieć kablowa;
- odbiorniki energii elektrycznej.

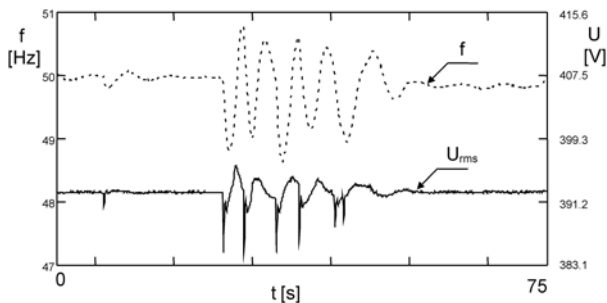
Przykładowy schemat trójfazowej sieci okrętowej z prądnicą wałową (PW), napędzaną silnikiem głównym (SG), prądnicą napędzaną turbiną (TG), zasilaną parą wytwarzaną w kotle ogrzewanym spalinami wylotowymi SG i prądnicami ( $G_1 \dots G_n$ ) oraz prądnicą awaryjną  $G_A$  napędzanymi pomocniczymi silnikami spalinowymi przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Przykładowy schemat elektroenergetycznej trójfazowej sieci okrętowej, zasilanej z różnych źródeł energii

Generatory okrętowe są „miękkimi” źródłami napięcia przemiennego, w których impedancja (zdeteminowana głównie reaktancją w osi podłużnej maszyny) może być rzędu nawet 15...20%, w porównaniu ze „sztywnymi” źródłami (4...6%) powszechnie stosowanymi w energetyce lądowej [9]. Stąd też, w sieciach okrętowych mamy relatywnie małe prądy zwarciove, a więc również ograniczone prądy zwarciove. Niewątpliwie specyfiką sieci okrętowych jest występowanie w nich odbiorników - głównie silników asynchronicznych o mocach porównywalnych z mocami źródeł energii. W przypadku, gdy silnik znajduje się w niewielkiej odległości od miejsca zwarcia, napięcie na jego zaciskach praktycznie spada do zera. Silnik zachowuje się wówczas jak prądnica, zasilając miejsce zwarcia z zasobu energii kinetycznej mas wirujących i energii powstałej z zanikającego pola elektromagnetycznego silnika [5]. Udział silników asynchronicznych w prądzie zwarciowym trwa kilka okresów i może sięgać 50% prądu zwarciowego od prądnic, który w sieciach okrętowych ma stosunkowo dużą wartość udarową, co istotnie wpływa na wytrzymałość dynamiczną aparatów takich jak: wyłączniki, odłączniki, bezpieczniki.

Elektroenergetyczna sieć okrętowa jest siecią „elastyczną”. Charakteryzuje się ona dużymi zmianami napięcia i częstotliwości, wynikającymi z porównywalnych mocy elektrowni okrętowej i załączanych dużych, często „niespokojnych” odbiorników energii np. sterów strumieniowych, pomp, sprężarek. Przykładowo, moce elektrycznych silników napędowych sterów strumieniowych często przekraczają 1MW, a moc wolnostojącego zespołu prądowłórczego może być poniżej tej wartości [17], [18]. Na rysunku 2 przedstawiono przebieg zmian wartości skutecznej i częstotliwości napięcia zasilającego w czasie rozruchu wentylatorów ładowni na statku typu ro-ro [19].



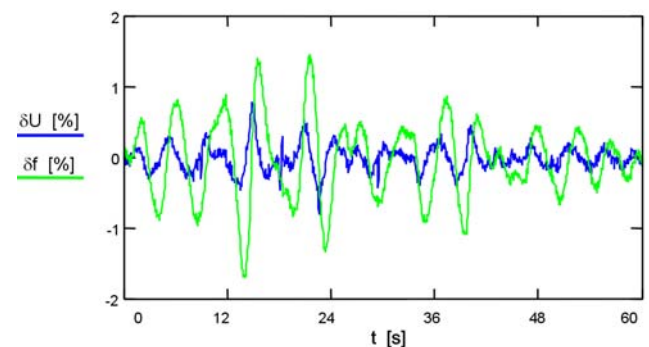
Rys.2. Przebieg zmian wartości skutecznej i częstotliwości napięcia zasilającego na szynach rozdzielnic głównej statku typu ro-ro w czasie rozruchu wentylatorów ładowni

Przebiegi pokazane na rysunku 2 wyznaczono z wykorzystaniem cyfrowego układu pomiarowego, gdzie częstotliwość określano poprzez analizę przejść przez zero „(-/+)” z wykorzystaniem zmian znaku dwóch sąsiednich próbek napięcia [3], [10].

Reasumując, w przypadku zmian konfiguracji okrętowego systemu elektroenergetycznego wynikających z załączania i wyłączania prądnic oraz „niespokojnych” (często nieliniowych) odbiorników, mimo poprawnej pracy zarówno układów regulacji napięcia generatorów, jak i układów regulacji prędkości obrotowej silników napędowych prądnic, zmiany (kołysania) parametrów sieci okrętowej są wyraźnie odczuwalne.

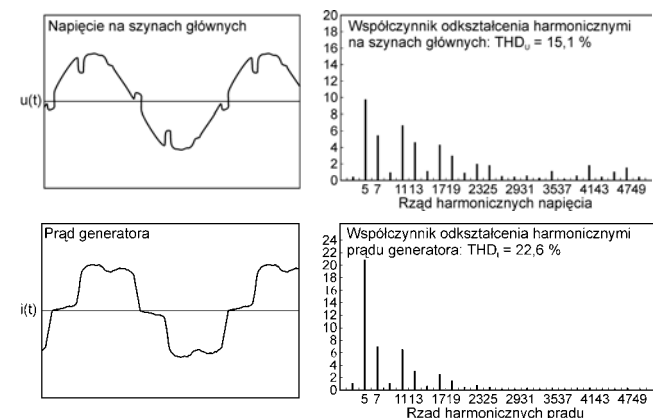
Oddzielną grupę czynników powodujących zmiany napięcia i częstotliwości w okrętowych sieciach elektroenergetycznych stanowią czynniki środowiskowe. Urządzenia elektryczne i elektroniczne pracujące w

środowisku okrętowym poddane zostają działaniu ekstremalnych warunków zewnętrznych, takich jak: wysoka i niska temperatura powietrza, mgła solna, zalewanie wodą, wysoka wilgotność powietrza, wibracje, wstrząsy i kołysania. Wszystkie te czynniki, ograniczając trwałość ważnych elementów systemu, mogą mieć pośredni wpływ na jakość energii elektrycznej. Czynnikiem, wpływającym bezpośrednio na zmiany wartości skutecznej napięcia i jego częstotliwości w rozważanych sieciach jest stan morza, zwłaszcza w czasie pracy prądnicy wałowej. W przypadku dużej fali dochodzi do zmian prędkości obrotowej silnika głównego na skutek zmian jego obciążenia. W efekcie pogarsza się jakość wytwarzania energii elektrycznej przez sprzęgniętą z silnikiem głównym prądnicę wałową. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w przypadku bezpośredniego przyłączenia prądnicy wałowej do szyn głównych. Na rysunku 3 przedstawiono odchylenia względne wartości skutecznej i częstotliwości napięcia zasilającego od ich wartości średniej w trakcie rejsu statku typu ro-ro [3]. Stan morza w czasie pomiaru wynosił 4÷5°B, a kurs statku był przeciwnie skierowany do kierunku wiatru i fali.



Rys.3. Odchylenia wartości skutecznej i częstotliwości napięcia od ich średniej wartości dla statku typu ro-ro w czasie jazdy w morzu w trudnych warunkach żeglugowych

Dodatkowo, ważnym wyróżnikiem elektroenergetycznych sieci okrętowych na współczesnych statkach jest występowanie odkształconych przebiegów napięcia i prądu (rys.4), powodowanych powszechnym stosowaniem przekształtników półprzewodnikowych m.in. w układach napędowych oraz w układach umożliwiających współpracę prądnic wałowych z siecią okrętową [3], [4], [20], [21], [22].



Rys.4. Przykładowe przebiegi napięcia u(t) na szynach głównych i prądu i(t) generatora wraz z odpowiadającymi im widmami amplitudowymi dla elektrowni okrętowej obciążonej przekształtnikiem sześciopulsowym [20]

Im źródło napięcia jest bardziej „miękkie” (ma większą impedancję), tym wyższe zniekształcenia napięcia

występują dla odkształconego prądu [9]. Konsekwencją powyższego jest konieczność ograniczenia poziomu poszczególnych składowych harmonicznych prądu a tym samym sumarycznego zniekształcenia harmonicznymi napięcia. Do najczęściej wykorzystywanych technik w tym zakresie należy stosowanie dławików wygładzających, wieloimpulsowych układów napędowych, transformatorów z przesunięciem fazowym oraz filtrów pasywnych i aktywnych [9], [15], [20], [23].

Innym elementem, charakterystycznym dla okrętowej sieci elektroenergetycznej jest praca równoległa co najmniej dwóch zespołów prądowców w okresach przewidywanego zwiększonego zapotrzebowania na energię, takich jak manewry i prace przeładunkowe urządzeniami statku. Powoduje to konieczność regulacji rozdziału mocy czynnej i biernej pomiędzy współpracujące prądnice. Nieproporcjonalny rozdział mocy może spowodować pozorne przeciążenie elektrowni okrętowej, a w konsekwencji odłączenie odbiorów mniej ważnych lub nawet zanik zasilania w elektroenergetycznej sieci okrętowej tzw. "blackout" [3], [4], [23], [25], o skutkach trudnych do przewidzenia, szczególnie w trudnych warunkach pogodowych. Występowanie wyżej przedstawionych zjawisk i uwarunkowań ma istotny wpływ na jakość energii elektrycznej w rozważanych sieciach okrętowych.

### Jakość energii elektrycznej w systemach okrętowych w świetle przepisów towarzystw klasyfikacyjnych

Jakość energii elektrycznej w okrętowym systemie elektroenergetycznym można zdefiniować za pomocą zbioru parametrów opisujących proces wytwarzania, rozdziału i użytkowania energii elektrycznej we wszystkich stanach eksploatacyjnych statku (manewry, podróż morska, postój w porcie) [4], [19]. Zbiór ten obejmuje parametry napięć i prądów (wartość skuteczna, częstotliwość, asymetria, kształt przebiegu czasowego) we wszystkich punktach analizowanego systemu oraz parametry opisujące ryzyko utraty ciągłości zasilania (rozdział obciążeń czynnych i biernych między równoległe pracującymi zespołami prądowców). Tak zdefiniowana jakość energii elektrycznej jest pojęciem obejmującym zarówno szeroki horyzont czasowy, równy czasowi eksploatacji statku, jak i stosunkowo rozległy przestrzennie obszar, od pokładu, przez pomieszczenia załogowe i pasażerskie, aż do siłowni i ładowni.

Jakość energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej jest uwarunkowana zarówno jakością wytwarzania energii przez zespoły prądowców, jak również jakością jej użytkowania przez odbiorniki energii elektrycznej. Choć obydwa te zagadnienia ściśle łączą się ze sobą, to rozróżnienie dotyczące jakości wytwarzania i użytkowania energii elektrycznej na statkach ma również wymiar legislacyjny. Przykładowo, Przepisy Klasyfikacji i Budowy Statków, wg. PRS [27] oddzielnie określają dokładność dynamicznej i statycznej regulacji napięcia i częstotliwości dla zespołów prądowców wraz ze współpracującymi z nimi układami regulacji prędkości obrotowej i napięcia (wytwarzanie energii elektrycznej) i oddzielnie definiują dopuszczalne wartości odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowych w elektroenergetycznej sieci okrętowej ze względu na poprawną pracę odbiorników (użytkowanie energii elektrycznej) [27], [28]. Zgodnie z przepisami PRS regulator napięcia prądnicy powinien zapewniać utrzymywanie napięcia w stanie ustalonym z dokładnością  $\pm 2,5\%$  (przy znamionowym współczynniku mocy). Natomiast odbiorniki energii elektrycznej instalowane w rozważanych systemach powinny pracować prawidłowo przy długotrwałych

odchyleniach napięcia od wartości znamionowej  $+6\%$  i  $-10\%$ . Pierwsze z wymienionych wymagań muszą być bardziej rygorystyczne, z uwagi na wcześniej opisane uwarunkowania, wynikające ze specyfiki elektroenergetycznych systemów okrętowych, powodujące pogorszenie jakości wytwarzanej energii poprzez wpływ nieliniowego i „niespokojnego” obciążenia sieci. Przykładowo, o ile moment pojawienia się zaburzeń związanych z włączeniem pomp heelingowych, sterów strumieniowych czy też dźwigów pokładowych może zostać w miarę dokładnie określony, o tyle momenty załączeń i wyłączeń urządzeń pracujących w cyklach automatycznych np. chłodziarek, sprężarek czy pomp zainstalowanych w odpowiednich obiegach technologicznych są trudne do określenia, gdyż wynikają one ze zmiennych warunków pracy kontrolowanych obiektów. W tym kontekście, impedancje elementów składowych sieci okrętowych ulegają zmianom w szerokim zakresie, głównie na skutek załączania i wyłączania prądnic i odbiorników, tj. planowanych bądź wymuszanych przełączeń dużych mocy w rozważanej sieci.

Dodatkowo odchylenia napięcia w okrętowej sieci elektroenergetycznej są spowodowane spadkami napięcia na kablach zasilających, które według wymagań PRS [27] nie powinny przekraczać (w procentach napięcia znamionowego) odpowiedniej wartości. Przykładowo, dla kabli zasilających silniki prądu przemiennego z bezpośrednim rozruchem wynosi ona do  $25\%$  w chwili rozruchu.

Warto również wspomnieć o wymaganiach w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej dotyczących urządzeń elektrycznych i elektronicznych instalowanych w elektroenergetycznych sieciach okrętowych, które zgodnie z odpowiednimi normami [28], muszą być odporne na zaburzenia impulsowe nanosekundowe, zaburzenia impulsowe dużej energii oraz zaburzenia przewodzone wysokiej i niskiej częstotliwości. Nadto, rozważane urządzenia nie mogą być źródłem emisji zaburzeń promieniowanych i przewodzonych o parametrach przekraczających wartości dopuszczalne przywołane we wspomnianych przepisach.

Jakość wytwarzania energii elektrycznej w elektroenergetycznej sieci okrętowej dotyczy przede wszystkim zapewnienia niezawodności (ciągłości) zasilania szyn głównych elektrowni okrętowej napięciem o odpowiednich parametrach. Zależy ona głównie od rodzaju jednostek napędowych prądnic oraz charakterystyk urządzeń do regulacji napięcia prądnic okrętowych i regulacji prędkości obrotowej silników napędowych, a także od właściwości przekształtników energoelektronicznych wykorzystywanych w układach zasilających rozważane systemy.

Odchylenie napięcia i częstotliwości od ich wartości znamionowych, oddzielnie dla stanów statycznych i dynamicznych, najprościej można opisać w jednostkach względnych [8], [29], [30]:

$$(1) \quad \delta U = \frac{U - U_n}{U_n} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$(2) \quad \delta f = \frac{f - f_n}{f_n} \cdot 100 \quad [\%]$$

gdzie:  $U, f$  - aktualnie występujące wartości napięcia i częstotliwości w rozważanym punkcie systemu,  $U_n, f_n$  - wartości znamionowe napięcia i częstotliwości.

Zgodnie z wymaganiami PRS [27] i PN-IEC 60092-101:2001 [31] prądnice okrętowe prądu przemiennego powinny wytwarzać praktycznie sinusoidalne napięcie trójfazowe symetryczne, tzn. różnica między wartością chwilową krzywej generowanego napięcia, a odpowiednią wartością pierwszej harmonicznej, nie powinna przekraczać 5% wartości szczytowej pierwszej harmonicznej [27], a asymetria napięcia międzyfazowego (ciągła) wartości 3% [30]. Jednak w czasie eksploatacji mogą pojawić się niesymetrie napięć fazowych prądnic okrętowych związane z niesymetrycznym obciążeniem lub natury konstrukcyjnej. Zjawisko takie zostało wielokrotnie odnotowane w czasie eksploatacji statków, np. spowodowane przesunięciem osi symetrii wirnika względem osi symetrii stojana na skutek wyżłobienia wału wirnika w miejscu jego ułożyskowania lub zwarciami międzyzwojowymi [3], [4].

Wcześniej wspomniana konieczność regulacji rozdziału mocy czynnej i biernej między współpracujące równoległe zespoły prądotwórcze jest również określona wymaganiami przepisów PRS [26], w oparciu o odpowiednio zdefiniowane wskaźniki rozdziału mocy czynnej  $i$ -tej prądnicy  $\delta P_i$  i jej mocy biernej  $\delta Q_i$ , pracującej równoległe;

$$(3) \quad \delta P_i = \frac{P_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^k P_i}{P_n} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$(4) \quad \delta Q_i = \frac{Q_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^k Q_i}{Q_n} \cdot 100 \quad [\%]$$

gdzie:  $P_i$ ,  $Q_i$  - obciążenie czynne (bierne)  $i$ -tej prądnicy,  $P_n$ ,  $Q_n$  - znamionowe obciążenia czynne lub bierne prądnicy o największej mocy pracującej równoległe albo 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 równoległe,  $k$  - liczba pracujących równoległe prądnic,  $\alpha_i$  - współczynnik proporcjonalności zależny od liczby i mocy współpracujących zespołów prądotwórczych ( $\alpha_i = 0,5$  dla  $k = 2$  i równych mocy współpracujących zespołów).

Natomiast 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. Jakość użytkowania energii elektrycznej wiąże się przede wszystkim z symetrią obciążenia oraz jego nieliniowością. Istotny jest także fakt, czy załączane obciążenie należy do grupy tzw. odbiorników niespokojnych. Reasumując, zakłócające działanie odbiorników energii elektrycznej na jej jakość w sieci okrętowej objawia się przede wszystkim w postaci stanów przejściowych, wprowadzania wyższych harmonicznych prądu do sieci oraz asymetrii obciążenia.

Do oceny asymetrii napięcia zasilającego można wykorzystać wskaźnik procentowej asymetrii napięciowej  $C_{va}$  określony jako stosunek największej odchyłki napięcia  $U$  od średniej wartości napięcia  $U_{sr}$  do średniej wartości napięcia [30]:

$$(5) \quad C_{va} = \frac{U - U_{sr}}{U_{sr}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Dużą zaletą tego wskaźnika, w odróżnieniu od wskaźnika asymetrii opisywanego z wykorzystaniem składowych symetrycznych kolejności zgodnej, przemiennej i zerowej [4], [29], [30], jest łatwość jego wyznaczania oraz bezpośrednie odniesienie do dopuszczalnego obciążenia silnika indukcyjnego. Zgodnie z ustaleniami Międzynarodowej komisji Elektrotechniki (IEC Raport 892/1987), obciążenie silnika indukcyjnego należy ograniczyć w stopniu zależnym od  $C_{va}$ , do 0,9 mocy znamionowej przy wskaźniku równym 3% i do 0,75 mocy znamionowej przy wskaźniku równym 5%.

Zniekształcenia napięcia w sieciach okrętowych w przeszłości spowodowane były głównie procesami łączeniowymi w aparaturze rozdzielczej i w odbiornikach oraz przepięciami przy przepalaniu się bezpieczników. Dzisiaj często wywoływane są one przez powszechnie stosowane przekształtniki półprzewodnikowe. Zniekształcenia te, dla sieci okrętowych, można określić za pomocą wskaźnika zniekształcenia napięcia THD oraz wskaźnika maksymalnego odchylenia chwilowej wartości napięcia od pierwszej harmonicznej  $u_w$  [27], [32].

$$(6) \quad THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} U_n^2}}{U_1} \cdot 100 \quad [\%]$$

gdzie:  $U_n$  - wartość skuteczna  $n$ -tej harmonicznej napięcia,  $U_1$  - wartość skuteczna podstawowej harmonicznej napięcia.

$$(7) \quad u_w = \frac{\Delta U_m}{\sqrt{2} \cdot U_1} \cdot 100 \quad [\%]$$

gdzie:  $\Delta U_m$  - wartość maksymalna odchylenia,  $U_1$  - wartość skuteczna pierwszej harmonicznej napięcia.

Zgodnie z przepisami PRS wskaźnik zniekształceń napięcia THD nie powinien być większy od 10%, natomiast wskaźnik maksymalnego odchylenia  $u_w$  chwilowej wartości napięcia od pierwszej harmonicznej nie powinien przekraczać 30%.

Wybrane wymagania towarzystw klasyfikacyjnych dotyczące omawianej problematyki przedstawiono w tabeli 1 [27], [32], [33].

Tabela 1. Zestawienie wskaźników jakości energii elektrycznej w systemie okrętowym w odniesieniu do polskich oraz międzynarodowych Przepisów Towarzystw Klasyfikacyjnych

	IACS	PRS	LLOYD	DNV	NKK	ABS	RS
THD [%]	***	10*	8	5 10	***	**	10
$u_w$ [%]	-	30	-	-	-	-	30
$\delta U$ [%]	-10,+6	-10,+6	-10,+6	-10,+6	-10,+6	-10,+6	-10,+6
$\delta f$ [%]	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 5$
$\delta U_i$ [%] $t=1,5s$	$\pm 20$	+20,-15	+20,-15	+20,-15	$\pm 20$	$\pm 20$	$\pm 20$
$\delta U_i$ [%] $t=5s$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$
$\delta P_i$ [%]	-	15/25	15/25	15/25	15/25	15/25	15/25
$\delta Q_i$ [%]	---	10/25	5	10/25	10/25	10/25	10/25

\* - dla systemu z przekształtnikami elektronicznymi

\*\* - w przygotowaniu

\*\*\* - brak aktualnych danych

W tabeli przyjęto następujące oznaczenia: IACS - International Association of Classification Societies, PRS -

Polski Rejestr Statków, Lloyd - Lloyd's Register of Shipping, DNV - Det Norske Veritas, NKK - Nippon Kaiji Kyokai, ABS - American Bureau of Shipping, RS - Register of Shipping (Rosyjskie Towarzystwo Klasyfikacyjne) THD - współczynnik zniekształceń napięcia, harmonicznymi  $u_w$  - współczynnik odchylenia wartości chwilowej napięcia od pierwszej harmonicznej,  $\delta U$  ( $\delta U_d$ ) - współczynnik statycznego (dynamicznego) odchylenia napięcia,  $\delta f$  ( $\delta f_d$ ) - współczynnik statycznego (dynamicznego) odchylenia częstotliwości,  $\delta P_i$  ( $\delta Q_i$ ) - współczynnik statycznego rozprywu obciążenia czynnego (biernego),  $t$  - czas krótkotrwałego odchylenia napięcia i częstotliwości od wartości znamionowej.

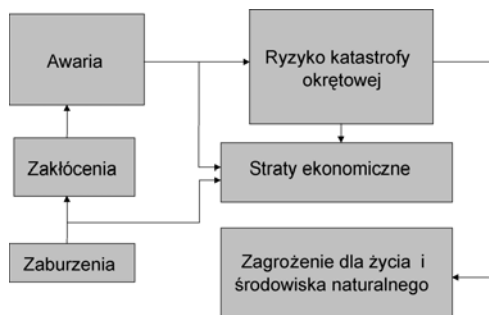
Porównując wymagania dotyczące jakości energii elektrycznej określone przez towarzystwa klasyfikacyjne dla statków morskich z analogicznymi wymaganiami zdefiniowanymi w normie europejskiej EN 50160 dla sieci lądowych, można sformułować następujące wnioski:

- przepisy towarzystw klasyfikacyjnych określają dopuszczalne zakresy wahań napięcia i jego częstotliwości, współczynnik zniekształceń napięcia harmonicznymi, współczynnik odchylenia wartości chwilowej napięcia od pierwszej harmonicznej oraz współczynnik statycznego rozdziału obciążeń czynnych i biernych;
- natomiast, w rozróżnianych przepisach brak jest współczynników zawartości poszczególnych harmonicznymi i interharmonicznymi, współczynnika średniego zniekształcenia napięcia harmonicznymi, współczynników średnich odchylenia napięcia i częstotliwości oraz współczynnika asymetrii napięciowej.

Warto podkreślić brak ostatniego z wymienionych współczynników (jak dotąd żadne z towarzystw klasyfikacyjnych nie wprowadziło stosownych zapisów w tym zakresie), mimo definicji podanych w normie PN-IEC 60092-101:2001 [31]. Istotnym mankamentem przepisów towarzystw klasyfikacyjnych jest również brak wymagań i opisu procedur odnośnie systematycznej kontroli jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych.

### Konsekwencje zaniżenia jakości energii elektrycznej w rozważanych systemach

W okrętowych sieciach elektroenergetycznych mamy do czynienia z częstym istotnym obniżeniem jakości energii elektrycznej z uwagi na występujące w nich szerokie spektrum zaburzeń elektromagnetycznych. Zaburzenia te powodują wymierne straty ekonomiczne w urządzeniach elektrycznych zasilanych z rozważanych sieci, ale przede wszystkim niosą ryzyko zakłócenia pracy ważnych elementów składowych tychże sieci (rys.5).



Rys.5. Konsekwencje zaniżonej jakości energii elektrycznej w okrętowych systemach elektroenergetycznych

Do najczęściej obserwowanych zaburzeń w rozważanych systemach należą wspomniane wcześniej:

- zmiany wartości napięcia i jego częstotliwości,
- asymetria napięcia,

- zniekształcenia krzywej przebiegów czasowych sygnałów powodowane harmonicznymi oraz zjawiskami typu „transient” i „notching”,
- nieproporcjonalny rozdział mocy czynnych i biernych między pracujące równolegle zespoły prądotwórcze.

Zakłócenia pracy istotnych elementów systemu elektroenergetycznego (silnik główny, prądnice, odbiorniki o żywotnym znaczeniu dla funkcjonowania statku) mogą wywołać awarię o poważnych konsekwencjach ekonomicznych, ale mogą również, przy splocie niesprzyjających okoliczności (np. utrata manewrowości statku w sytuacji kolizyjnej) doprowadzić do katastrofy morskiej zagrażającej życiu ludzkiemu i środowisku naturalnemu. Dlatego, też biorąc pod uwagę ogromne znaczenie systemu elektroenergetycznego dla funkcjonowania pozostałych systemów statku (np. systemu nawigacyjnego czy napędowego) należy dokonać gruntownej analizy potencjalnych przyczyn zaburzeń, aby móc im skutecznie przeciwdziałać. Do najważniejszych przyczyn zaburzeń występujących w okrętowych systemach elektroenergetycznych zaliczyć można:

- niestaranność w projektowaniu i wykonywaniu systemu,
- błędy w jego eksploatacji („human error” jest wg statystyk International Maritime Organisation (IMO) dominującą przyczyną wypadków na morzu),
- awarie ważnych elementów systemu (np. filtrów harmonicznymi współpracujących z prądnicami wałowymi),
- procesy łączeniowe i powodowane nimi przepięcia w aparaturze rozdzielczej i odbiornikach,
- wpływ stosowanych urządzeń elektroenergetycznych.

Szczególnie ostatnia z wymienionych przyczyn zasługuje na baczniejszą uwagę, gdyż w połączeniu z „miękkością” sieci, wspomniane przekształtniki energoelektroniczne, o szybko rosnących mocach [9] powodują niedopuszczalne zniekształcenia napięcia. Rejestrowane w sieciach okrętowych rzeczywiste wartości THD często przekraczają 15%, a nawet 20% [6], [7], [9], [18], [20], znacznie przekraczając wartości dopuszczalne określone w przepisach towarzystw klasyfikacyjnych (tab. 2).

Konsekwencje zaniżonej jakości energii elektrycznej w sieciach okrętowych (rys.6) można sprowadzić do dwóch głównych rodzajów oddziaływań: strat ekonomicznych oraz zagrożenia dla życia i środowiska naturalnego, wywołane pogorszeniem bezpieczeństwa eksploatacji statku.

Drugi z wymienionych aspektów ma znaczenie podstawowe, czego wyrazem jest ujęcie wielu zagadnień związanych z bezpieczną eksploatacją systemów technicznych statku (w tym elektroenergetycznego) w odnośnych konwencjach przyjętych pod auspicjami International Maritime Organization, takich jak SOLAS [35], MARPOL [36] czy STCW '78/95 [37]. Wymienione konwencje dotyczą bezpieczeństwa życia na morzu, zapobieganiu zanieczyszczenia morza przez statki i wymagań w zakresie szkolenia marynarzy, wydawania świadectw i pełnienia wacht.

Każdy z wcześniej wymienionych rodzajów zaburzeń ma wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji statku, przy czym nie bez znaczenia jest potwierdzany doświadczalnie [38], [39] efekt negatywnej synergii zaburzeń.

Biorąc pod uwagę skalę zagadnienia, w pierwszym rzędzie należy wspomnieć o wpływie pogorszenia parametrów napięcia zasilającego na funkcjonowanie silników elektrycznych instalowanych w systemach okrętowych. W ogólnym przypadku silniki zasilane są napięciem odkształconym, niesymetrycznym, o znacznie zmieniającej się częstotliwości i wartości skutecznej napięcia, co powoduje sumowanie się różnego rodzaju strat energetycznych. Znaczne odchylenia wartości napięcia i

częstotliwości, a także stosunku napięcia i częstotliwości od ich wartości znamionowych, przy jednocześnie zazwyczaj występujących zniekształceniach krzywej napięcia i jego asymetrii oraz istniejących w miejscu pracy narażeniach klimatycznych (np. wysoka temperatura otoczenia nierzadko przekraczająca 50°C), powodują istotne zmniejszenie trwałości tych urządzeń. Te niespotykane w energetyce lądowej czynniki narażenia, przy jednoczesnym braku możliwości ograniczenia obciążeń w czasie eksploatacji urządzeń okrętowych narzucają konieczność opracowania nowych metod doboru silników elektrycznych do mocy zapotrzebowanej, przy założeniu jednoczesnego oddziaływania wyżej wspomnianych czynników [3], [4], [25], [38].

Na pracę łączników z napędem elektrycznym, decydujący wpływ mają głębokie zapady napięcia. Obniżenie wartości napięcia powoduje w konsekwencji obniżenie siły docisku i możliwość iskrzenia styków, aż do odpadnięcia zwory w przypadku znacznych zapadów 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. 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.

Wpływ odchyłek napięcia na źródła światła zależy od charakteru tych odchyłek oraz rodzaju analizowanego elementu świetlnego. Do najczęściej stosowanych na statkach źródła światła należą żarówki i świetlówki [4], [25]. Dla obu rodzajów źródeł 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.

Zniekształcenia krzywej napięcia zasilającego to przede wszystkim wyższe harmoniczne i interharmoniczne, a także zaburzenia impulsowe (typu „transient” i „notching”) oraz szumy szerokopasmowe. W zależności od charakteru zaburzenia wywierają one różny wpływ na funkcjonowanie źródeł, sieci przesyłowych i odbiorników energii elektrycznej. W odniesieniu do źródeł i odbiorników energii elektrycznej wpływ związany z bezpieczeństwem statku objawia się głównie poprzez:

- przegrzanie oraz trwałe uszkodzenia łożysk, izolacji blach i uzwojeń prądnic, spowodowane m.in. starzeniem termicznym materiałów elektroizolacyjnych,
- przegrzanie stojana i wirnika silników elektrycznych o stałej prędkości obrotowej, ryzyko uszkodzenia łożysk zależne od stopnia nagrzania wirnika, dodatkowe przyrosty temperatury izolacji i jej przyspieszone starzenie termiczne, szczególnie zagrożenie występuje w przypadku silników w wykonaniu przeciwybuchowym pracujących w strefach zagrożonych wybuchem,
- niezamierzone wyzwolenie wyłączników, zakłócenia w całym wyposażeniu pokładowych systemów elektrycznych, elektronicznych i sterowniczych, w tym komputerów nawigacyjnych, urządzeń radionawigacyjnych, oświetlenia, itp.

Występująca w elektrowniach okrętowych konieczność równoległej pracy zespołów prądotwórczych stwarza możliwość nieprawidłowego rozdziału obciążeń między równoległe pracujące zespoły prądotwórcze, którego konsekwencją jest przede wszystkim pozorne przeciążenie

elektrowni okrętowej przy istniejącym jeszcze zapasie mocy. Mechanizm pozornego przeciążenia elektrowni okrętowej polega na tym, iż 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 przejęcia obciążenia odłączonej prądnicy dochodzi do zaniku zasilania w całej sieci elektroenergetycznej, co może mieć poważne konsekwencje, rzutujące na bezpieczną eksploatację statku [3], [4], [23], [25], [26].

W elektrowniach okrętowych ze względów bezpieczeństwa konieczne jest utrzymywanie określonej nadwyżki mocy, z reguły ok. 20 % mocy pojedynczej prądnicy podczas jazdy w morzu [21] lub odpowiednio większej w czasie manewrów. Właśnie w czasie manewrów, każda awaria systemów związanych z napędem i sterowaniem statkiem niesie znaczne zagrożenie dla jego bezpieczeństwa. Stąd też, w takich warunkach szczególnie istotne staje się zapewnienie ciągłości zasilania w okrętowym systemie elektroenergetycznym.

Pogorszenie jakości energii elektrycznej, oprócz zmniejszenia bezpieczeństwa pracy statku, powoduje dodatkowe koszty. Koszty pogorszenia jakości energii elektrycznej związane z wcześniej wymienianymi rodzajami zaburzeń wynikają przede wszystkim z określonych strat energetycznych oraz częstszych przeglądów i napraw, związanych z obniżeniem trwałości wyposażenia okrętowego. Nadto, nieproporcjonalny rozptył obciążeń czynnych między równoległe pracujące wolnostojące zespoły prądotwórcze ma określone konsekwencje ekonomiczne powodując wzrost zużycia paliwa. Wynika to z nieliniowej charakterystyki wiążącej jednostkowe zużycie paliwa silnika spalinowego z jego obciążeniem [3], [4], [24]. 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.

Każda awaria okrętowego systemu elektroenergetycznego może zostać stosunkowo łatwo sklasyfikowana pod względem miejsca wystąpienia. Ocena przyczyn wystąpienia awarii jest jednak znacznie trudniejsza, zwłaszcza jeżeli faktyczną przyczyną było gwałtowne, krótkotrwałe pogorszenie jakości energii elektrycznej. Międzynarodowa Organizacja Morska gromadzi dane dotyczące awarii i katastrof okrętowych. W tabeli 2 przedstawiono dane dotyczące 120 przypadków awarii lub nieprawidłowego działania układów elektrycznych i elektronicznych, sklasyfikowane pod względem miejsca wystąpienia.

Tabela 2. Zestawienie awarii okrętowych związanych z funkcjonowaniem elektroenergetycznych systemów okrętowych [34]

Miejsce wystąpienia	Liczba przypadków	Udział procentowy
Napęd prądnicy	20	16,7
Prądnica	16	13,3
Sieć elektroenergetyczna	31	25,8
Urządzenia pomocnicze	18	15
Inne	27	22,5
Pożar / zalanie	8	6,7



Dane zawarte w tabeli 3 są niepełne i dotyczą jedynie poważnych awarii, które zostały zgłoszone przez załogę lub armatora odpowiednim władzom (np. instytucje klasyfikacyjne). Przedstawione zestawienie awarii nie określa ich przyczyn, a jedynie miejsce wystąpienia. Na uwagę zasługuje znaczna liczba awarii ujętych w punkcie „Inne”. Dotyczą one przypadków, które określono jako „nieznane” lub „błędy ludzkie”.

Na problem energetyki okrętowej i jakości energii elektrycznej, warto również spojrzeć od strony ekonomicznej w kategoriach globalnych. Pomimo relatywnie niewielkiej mocy pojedynczej elektrowni okrętowej (z reguły nie przekraczającej kilku MW), znaczna liczba - 30395 zarejestrowanych statków (podana liczba dotyczy tylko statków handlowych o tonażu powyżej 1000 gt (gross tonnage) zarejestrowanych, wg. stanu na dzień 1.01.2003 [16]) - ilustruje wagę prezentowanego problemu.

Zakładając średnią moc elektrowni okrętowej na poziomie **2MVA** i uwzględniając wcześniej wspomnianą liczbę 30395 statków, moc zainstalowaną w światowej flocie handlowej można szacować na około **60 000 MW**. Zestawiając tę wartość z mocą zainstalowaną w polskim lądowym systemie energetycznym równą około 34000 MW (przy czym rzeczywiste zużycie mocy zmienia się od **15000 MW do 22000 MW**, w zależności od zapotrzebowania [40]), warto zauważyć, iż w skali „makro” mamy do czynienia z problemem energetycznym o poziomie znacznie przekraczającym potrzeby europejskiego kraju średniej wielkości.

Nadto, należy wyraźnie podkreślić, iż w ostatnich kilku latach moc zainstalowana w systemie elektroenergetycznym pojedynczego statku dla wybranych typów statków (statki pasażerskie, tankowce, lodolamacze) wzrosła z kilku do kilkudziesięciu MW, a wyższy z dwóch lub trzech poziomów napięć w rozpatrywanych systemach sięga 10kV. Przykładowo, w jednym z rozwiązań firmy General Electric [41], elektryczny napęd główny na promach pasażerskich składa się z dwóch silników o mocach 19MW każdy, a elektrownia okrętowa wyposażona jest w pięć zespołów prądotwórczych o mocach 11,2MVA każdy. Innym, niezwykle spektakularnym przykładem, może być elektrownia okrętowa na „Queen Mary 2”, pracująca zarówno na potrzeby silników elektrycznych napędu głównego (znajdujących się w piastach „podów”, napędów podwieszanych - poza kadłubem statku), jak i wszelkich innych odbiorników, zdolna do wytworzenia mocy 118MW [42].

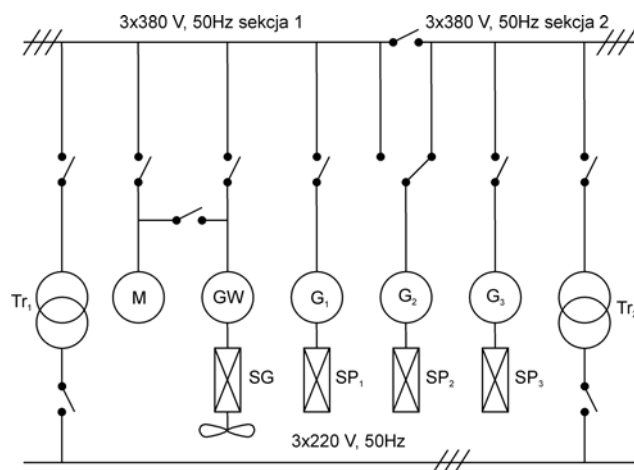
### Poprawa jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych

Ograniczenie negatywnego wpływu oddziaływania zaburzeń w napędach okrętowych z układami przekształtnikowymi może być realizowane poprzez:

- podział okrętowego systemu elektroenergetycznego na niezależne podsystemy z osobnymi źródłami energii elektrycznej,
- zastosowanie przetwornic elektromaszynowych,
- zastosowanie filtrów ograniczających zawartość wyższych harmonicznych,
- zastosowanie transformatorów separujących,
- zastosowanie wybranych rozwiązań konstrukcyjnych, np. transformatorów przekształtnikowych.

Warto podkreślić, że konwencja SOLAS zaleca podział szyn rozdzielnic głównej (dekompozycję systemu) dla elektrowni okrętowych o mocach wyższych od 3 MW [35]. Rozwiązanie to jest stosowane często w przypadku sterów strumieniowych, powodujących duże zmiany napięcia i częstotliwości w rozważanym systemie. Przykład tego

rodzaju konfiguracji rozdzielnic głównej elektrowni okrętowej przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Przykładowy schemat rozdzielnic głównej i elektrowni okrętowej z podziałem szyn rozdzielnic i możliwością zasilania steru strumieniowego z wydzielonego podsystemu: M - silnik napędowy steru strumieniowego, GW - prądnica wałowa, G<sub>1,2,3</sub> - prądnica wolnostojąca, Tr<sub>1,2</sub> - transformator 380/220 V, SG - silnik główny, SP<sub>1,2,3</sub> - silnik pomocniczy

Wydaje się jednak uzasadnione, aby było ono stosowane również w przypadku innych urządzeń, będących źródłami zaburzeń, takich jak np. przekształtniki energoelektroniczne, także w przypadku systemów o niższych mocach.

Szczegółowe omówienie metod poprawy jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych można znaleźć w bibliografii przedmiotu, m.in. [3], [4], [9], [15], [17], [20], [21], [41], natomiast ich przedstawienie wykracza poza przyjęte ramy niniejszego artykułu.

Mówiąc o poprawie jakości energii elektrycznej, warto podkreślić ogromne znaczenie pomiaru odnośnych wskaźników i w konsekwencji oceny jakości.

Celem oceny jakości energii elektrycznej jest przede wszystkim szybkie wykrywanie zagrożeń dla funkcjonowania okrętowych systemów technicznych, a także ograniczenie skutków ekonomicznych pogorszenia tej wielkości. Warto podkreślić konieczność bieżącej kontroli jakości energii, która powinna dostarczyć istotnych informacji diagnostycznych odnośnie 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. Ograniczona, rozumiana przestrzennie, rozległość okrętowego systemu energetycznego i relatywnie niewielka liczba odbiorników zakłócających stwarzają wyjątkową możliwość szybkiej detekcji zaburzenia wraz z określeniem jego źródła. Jednak prawidłowa ocena jakości energii elektrycznej w tym systemie jest zagadnieniem dość złożonym i wymaga wyznaczenia wielu różnorodnych wskaźników, które powinny być wykorzystane w procesie bieżącej eksploatacji statku.

Przy opracowaniu odpowiedniego zestawu wskaźników do oceny jakości energii elektrycznej w okrętowych systemach elektroenergetycznych uwzględniono trzy kryteria [3], [43]:

- bezpieczeństwa pracy okrętowych systemów technicznych,

- ekonomicznej efektywności eksploatacji okrętowych systemów technicznych,
- dostępności pomiarowej i łatwej obsługi wymaganego instrumentarium pomiarowego

Niezależnie od wskaźników, opisanych zależnościami (1) ... (7) charakteryzujących zaburzenia o charakterze krótko i długotrwałym tj. o czasach trwania od około 1s do 1min i odpowiednio dłuższych. W ostatnim okresie coraz większym problemem w elektroenergetycznych sieciach zasilających stają się zaburzenia przejściowe (impulsowe), w tym „transient” i „notching” o czasach trwania od kilkudziesięciu nanosekund do kilkudziesięciu milisekund [43], [44]. Zaburzenia przejściowe (impulsowe) zawierają składowe wysokoczęstotliwościowe i występują jedynie krótko po wystąpieniu gwałtownej zmiany w systemie elektroenergetycznym. O naturze zaburzeń typu „notching” najlepiej mówi ich spotykana w literaturze nazwa „periodic transient” [44].

Wpływ zaburzeń przejściowych na pracę odbiorników energii elektrycznej np. komputerów zależy od amplitudy zaburzenia i czasu jego trwania. Typową metodą opisu zaburzeń przejściowych jest wyznaczenie amplitudy zaburzenia, czasu jego trwania oraz energii [43], [44].

Biorąc powyższe pod uwagę, warto podkreślić, iż ocena jakości energii elektrycznej jest niemożliwa do przeprowadzenia z wykorzystaniem stosowanych obecnie jednoparametrowych analogowych przyrządów pomiarowych. Nawet bardziej złożone rozwiązania przyrządów wieloparametrowych, takich jak Synpol<sup>®</sup>D [4], [43] oparte na wykorzystaniu techniki mikroprocesorowej, pomimo zwiększenia liczby kontrolowanych parametrów nie gwarantują pełnej oceny jakości energii elektrycznej [4]. Mając na uwadze znaczną liczbę wcześniej zdefiniowanych wskaźników opisujących jakość energii elektrycznej w rozważanym systemie należy rozważyć wykorzystanie do oceny tej wielkości specjalizowanego wieloparametrowego urządzenia pomiarowego – analizatora jakości energii elektrycznej. Analizator taki powinien być urządzeniem stacjonarnym, na stałe wbudowanym w okrętowy system elektroenergetyczny. Koncepcję takiego analizatora, opartego o dwukanałowy układ do wyznaczania parametrów jakości energii (parametry podstawowe i parametry uzupełniające) przedstawiono m.in. w pracach [45], [46].

### **Czy można sterować jakością energii w okrętowych systemach elektroenergetycznych?**

Należy wyraźnie podkreślić, że sterowanie jakością energii jest wyzwaniem stojącym przed projektantami okrętowych systemów elektroenergetycznych i ich eksploatatorami, tj. załogami statków. Biorąc pod uwagę wskazane wcześniej uwarunkowania dotyczące przyczyn i mechanizmów powstawania zakłóceń, związanych z przetwarzaniem energii elektrycznej w rozważanych systemach, można myśleć zarówno o pasywnym jak i aktywnym sterowaniu jakością energii. Pod pojęciem sterowania jakością energii należy rozumieć zastosowanie takich rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych, które eliminują, bądź istotnie ograniczają, oddziaływanie omawianych zakłóceń. Do działań takich niewątpliwie należy stosowanie filtrów (głównie pasywnych) wyższych harmonicznych. Należy jednak podkreślić, iż pojawiają się pierwsze wzmianki dotyczące możliwości wykorzystania filtrów aktywnych bądź hybrydowych w systemach okrętowych [9], [34].

Innym działaniem w tym zakresie, zalecanym m.in. przez konwencję SOLAS [35], jest wspomniana odpowiednia konfiguracja Rozdzielniczy Głównej. Wówczas odbiorniki o większej wrażliwości na zmiany parametrów napięcia

zasilającego (np. satelitarne systemy bezpieczeństwa GMDSS) i specjalnym znaczeniu dla bezpieczeństwa statku mogą być zasilane z wydzielonego podsystemu. Wydaje się, że takie sekcjonowanie "a priori" Rozdzielniczy Głównej jest rozwiązaniem bardziej efektywnym ekonomicznie niż rozbudowa elementów zabezpieczających, np. złożonych filtrów.

Jednak warunkiem koniecznym sterowania jakością energii elektrycznej jest informacja pomiarowa, która może być uzyskana za pomocą wieloparametrowego urządzenia pomiarowego - analizatora jakości energii elektrycznej. Analizator taki mógłby być docelowo systemem automatycznego sterowania jakością energii elektrycznej, w którym informacja pomiarowa o jej parametrach byłaby przetwarzana na sygnały sterujące układami regulacji napięcia i częstotliwości oraz wyłącznikami poszczególnych zespołów prądowców. Niezależnie od tych funkcji proponowany system sprawowałby bieżący nadzór nad funkcjonowaniem elektroenergetycznego systemu okrętowego przez załogę statku. Warto podkreślić, iż wstępne wyniki badań na obiektach rzeczywistych (m.in. statek HORYZONT II) [43], [47] wskazują, iż zbudowany moduł pomiarowy może autonomicznie pracować w elektroenergetycznym systemie okrętowym, jako układ do pomiaru parametrów sieci elektroenergetycznej i bieżącej kontroli jakości energii elektrycznej oraz sygnalizacji stanów alarmowych.

### **Podsumowanie**

Przeprowadzone analizy i badania na wybranych statkach jednoznacznie wskazują na konieczność kompleksowego rozwiązania problemu jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych. Należy podjąć konkretne działania w celu zapobiegania zaburzeniom elektromagnetycznym (poprzez poprawę jakości energii elektrycznej w systemach lub wybranych podsystemach okrętowych) i ich skutkom (poprzez zwiększenie odporności odbiorników) oraz monitorowania jakości energii w sieciach okrętowych. W związku z tym problemem jakości energii elektrycznej i jej ocena powinny stać się jednym z priorytetów przy projektowaniu, wykonywaniu, klasyfikacji i eksploatacji okrętowych systemów elektroenergetycznych. W sposób oczywisty problem ten dotyczy wytwórców statków i ich użytkowników, a więc stoczni i armatorów oraz instytucji nadzorujących produkcję i eksploatację statków, czyli towarzystw klasyfikacyjnych. Właściwe rozwiązanie tego problemu wymaga odpowiedniej wiedzy i doświadczenia. Zadaniem uczelni morskich jest przygotowanie odpowiednich kadr dla stoczni, armatorów i instytucji klasyfikacyjnych, a także poszukiwanie nowych metod i sposobów ograniczania wpływu zaniżonej jakości energii elektrycznej na ekonomicznie efektywną i bezpieczną eksploatację statków.

### **LITERATURA**

- [1] De Abreu J.P., De Sa J.S., Prado C.C., Harmonic voltage distortion in isolated electric systems. *7<sup>th</sup> International Conference „Electrical Power Quality and Utilization”*, Kraków, 17-19 wrzesień 2003, 469-472.
- [2] Dzwonkowski A., Niezawodność zasilania wybranych obiektów przemysłowych o sezonowym charakterze pracy, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6/2003, 452-456.
- [3] Tarasiuk T., Analiza metod i układów do wyznaczania wskaźników jakości energii w okrętowych systemach elektroenergetycznych, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2001.
- [4] Mindykowski J., Ocena jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych z układami przekształtnikowymi, *Wyd. Okrętownictwo i Żegluga*, seria „Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki”, tom 44, Komitet Elektrotechniki PAN, 2001



- [5] *Elektryczne aparaty okrętowe* [red]. T.Lipski, wyd. WSM Gdynia, 1971
- [6] Ian C. Evans, Mitigation of harmonics for AC electric drives of thrusters and small ship's propellers, *The Harmonic Solutions Co.UK*
- [7] Hodge C.G., Mattick D.J., The Electric Warship (Parts I-VI), *Trans. IMarE*, vol. 108, 109, 110, 111, 112, 113, The Institute Of Marine Engineers, UK, (1996-2001)
- [8] Novell J.M., Young S.S., Beyond Electric Ship, *Trans. IMarE*, vol. 112, The Institute Of Marine Engineers, 2000
- [9] Evans I.C., Driving ahead - the progress of electric propulsion, *The Motor Ship*, September 2003, 28-34
- [10] Mindykowski J., Tarasiuk T., Measurement of supply voltage properties in ships' electrical power systems, *Metrology and Measurement Systems*, Polish Scientific Publishers PWN, vol.IX, no 1/2002, Warsaw 2002, 19-30
- [11] Burns D.J., Cluff K.D., Karimi K., Hrehov D.W., A novel power quality monitor for commercial airplanes, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Anchorage, Alaska, USA, May 2002, 1649-1653
- [12] Iden S., Rzakdi W., Mains Power Quality of Ships with, Electrical Drivers, *Simulations and Measurements, Proceedings of EPE Conference*, Graz, 2001, P.1 - P.10
- [13] Blokland E., Van Dijk E., Challenges and Limitations of All Electric Ship designs, *Proceeding of EPE'01 Conference*, Graz, 2001, P.1 - P.8
- [14] Jonasson I., Soder L., Power Quality on Ships - A questionnaire evaluation concerning island power system, *3<sup>rd</sup> International Symposium Civil or Military All Electric Ship - AES 2000*, October 2000, Paris, France
- [15] Schild W., Planitz W., Design of power supply systems with Duplex-Reactors, [www.schild.net/duplexdrossel/1/duplex.pdf](http://www.schild.net/duplexdrossel/1/duplex.pdf)
- [16] Shipping Statistics and Market Review, *Institute of Shipping Economics and Logistics*, nr 4, kwiecień 2003.
- [17] Wyszowski J., Wyszowski S., *Elektrotechnika Okrętowa - napędy elektryczne*, Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Wydawnictwo WSM, Gdynia 1998
- [18] Szmit E., Mindykowski J., Tarasiuk T., Jakość energii elektrycznej na statkach wspólnym problemem armatorów, stocznii, uczelni morskich i towarzystw klasyfikacyjnych, *Targi „Elektroinstalacje”, Sesja „Jakość energii elektrycznej”*, wyd. Fundacja Rozwoju Uniwersytetu Gdańskiego - SEP o/Gdańsk, Gdańsk 2004, 23-30
- [19] Mindykowski J., Tarasiuk T., Electrical energy quality under ships conditions, *XVI IMEKO World Congress*, Wiedeń 2000, vol. VII, 245-250
- [20] Reinecke H., Schild W., Harmonics in main electric supply systems with semiconductor rectifiers and subsequent methods of compensation, *IMECE'91*, Shanghai, China, 1991, 1-10
- [21] Wyszowski S., *Elektrotechnika Okrętowa. T.1*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk, 1991
- [22] Wyszowski S., *Energoelektronika na statkach*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk, 1981
- [23] Katarzyński J., Ship power plant operating problems connected with reactive power distribution between electric generators working in parallel, *Polish Maritime Research*, June 1995, vol.2, s. 27-30
- [24] Mindykowski J., Assessment of electric power quality in ship systems fitted with converter subsystems, *Polish Academy of Sciences, Electrical Engineering Committee*, Book Series: „Advances of Electrical Drives and Power Electronics”, Shipbuilding and Shipping Ltd, Gdańsk 2003
- [25] Mindykowski J., Tarasiuk T., Jakość energii elektrycznej, a ekonomiczna eksploatacja okrętowych systemów technicznych, 1998, *Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej*, Tom IV, z.2, 33-39
- [26] Mindykowski J., Tarasiuk T., Zagadnienie jakości wytwarzania i użytkowania energii elektrycznej w okrętowym systemie elektroenergetycznym, *Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej*, 1996, Tom II, z.2, 71-81
- [27] Przepisy Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich, *Polski Rejestr Statków*, Gdańsk, 1995, uzupełnienia 2000
- [28] Próby środowiskowe wyposażenia statków, *Przepisy PRS*, 11/P/2002
- [29] Kuźmirek Z., Zastosowanie komputerowych technik pomiarowych do badania jakości energii elektrycznej, *Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej*, 1995, Tom I, z.1, 47-53
- [30] Mindykowski J., Tarasiuk T., Wskaźniki jakości energii elektrycznej i ich pomiar w elektroenergetycznej sieci okrętowej, *Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej*, 1997, Tom III, z.1, 19-29
- [31] *PN-IEC 60092-101:2001*, Instalacje elektryczne na statkach, Część 101: Definicje i wymagania ogólne.
- [32] *Przepisy wybranych towarzystw klasyfikacyjnych: ABS, DNV, IACS, LR, NKK, RS* (ciągłe uaktualniane)
- [33] Type Test Specification, *IACS Req. E10* (1991), Rev.2.1 1999, Rev. 3 2001
- [34] Mindykowski J., Assessment and improvement of electric power quality in ship's modern systems, *5<sup>th</sup> International Marine Electrotechnology Conference and Exhibition, IMECE '2003*, Shanghai, September 2003, invited plenary paper, 8-21
- [35] *Konwencja SOLAS, Consolidated Edition*, International Maritime Organization, London, 1997
- [36] *Konwencja MARPOL 73/78*, International Maritime Organization, London, 1973, poprawiona 1978 i 1997
- [37] *Konwencja STCW 78/95*, International Maritime Organization, London, 1978, poprawiona 1995
- [38] Gnaciński P., Mindykowski J., Tarasiuk T., Influence of electrical power quality on induction cage machine durability, *7<sup>th</sup> International Conference „Electrical Power Quality and Utilization”, EPQU '03*, Kraków, 2003, 455-462.
- [39] Gnaciński P., Mindykowski J., Rupnik P., Tarasiuk T., Data Processing Development in the Field of Power Quality Monitoring, *IEEE IMTC 2004, Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Como, May 2004 (przyjęty do prezentacji i publikacji)
- [40] [www.pse.pl](http://www.pse.pl)
- [41] Electric propulsion for a cruise liner, *The Naval Architect*, January 1997
- [42] Stareńczak P.B.: *Queen Mary 2*. Budownictwo Okrętowe, Nr 1/2004, s. 19-26
- [43] Mindykowski J., Tarasiuk T., Ocena jakości energii elektrycznej w okrętowym systemie elektroenergetycznym - metody i narzędzia, *Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej*, Tom VIII, Z 1/2, 2002, 53-62
- [44] Arrillaga J., Watson N.R., Chen S., Power System Quality Assessment, John Wiley & Sons, 2001
- [45] Mindykowski J., Tarasiuk T., Two - channel estimation of voltage quality in ships' electrical power systems, *4<sup>th</sup> International Research and Educational Colloquium on Electronics*, 2003, Glamorgan, 19-24
- [46] Mindykowski J., Szweda M., Tarasiuk T., Measurement Equipment for Ships' Electrical Power Systems, *IEEE IMTC 2004, Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Como, May 2004 (przyjęty do prezentacji i publikacji)
- [47] Tarasiuk T., Mindykowski J., Weryfikacja doświadczalna analizatora jakości energii elektrycznej na statku m/s „Horyzont II”, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, nr 1/2003, 31-36

Autorzy: prof. dr hab. inż. Janusz Mindykowski, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: [janmind@am.gdynia.pl](mailto:janmind@am.gdynia.pl).