

Jakość energii elektrycznej na jednostkach pływających

Janusz Mindykowski, Edward Szmit, Tomasz Tarasiuk, Daniel Czarkowski

Wprowadzenie

Jednostkę pływającą, statek czy okręt, trudno porównywać z jakimkolwiek innym środkiem transportu. Od strony nawigacji i łączności może przypominać trochę samolot, a może nawet prom kosmiczny, natomiast od strony jego maszynowni bardziej podobny jest do wielkiej fabryki przemysłowej, z dziesiątkami urządzeń obsługujących silniki napędowe. Moc napędu statków ciągle wzrasta, a obecnie w przypadku tych największych przekroczyła już 100 MW. Wszystko to, rozmieszczone w niewielkiej – bardzo ograniczonej przestrzeni, wzajemnie oddziałuje, emitując temperatury, wibracje i zaburzenia elektromagnetyczne. Efekt działania narażeń mechanicznych i klimatycznych jest łatwo mierzalny i zauważalny, natomiast zaburzenia elektromagnetyczne są trudniej wykrywalne, a niewątpliwie wpływają one negatywnie na pracę i niezawodność wszystkich urządzeń elektrycznych. W skrajnych przypadkach mogą również niekorzystnie oddziaływać na samopoczucie ludzi.

Na statkach z napędem elektrycznym, tzw. *all electric ships*, moc zainstalowanych odbiorników nieliniowych często jest zbliżona do mocy elektrowni. Jako odbiorniki nieliniowe należy rozumieć układy, w których płynący prąd nie odpowiada liniowo stosowanemu napięciu. W praktyce są to na przykład silniki elektryczne sterowane za pomocą falowników. Wielkie zalety tego typu układów napędowych wpływają na dynamiczny rozwój elektrycznych napędów statku. Jednak nie ma rozwiązań idealnych, także przekształtniki energoelektroniczne posiadają zasadniczą wadę. Generując składowe harmoniczne prądów, zniekształcają podstawowy parametr jakości energii elektrycznej – napięcie.

Wymagania dotyczące jakości energii

Nadzór techniczny nad statkami sprawują instytucje klasyfikacyjne w oparciu o przepisy. Większość towarzystw ogranicza wielkość całkowitych zniekształceń harmonicznych napięcia (U_{THD}) do 5% w sieciach elektroenergetycznych ogólnego użytku oraz do 10% w systemach przeznaczonych do zasilania wyłącznie nieliniowych układów napędowych. W tym drugim przypadku zasadniczym warunkiem wielu instytucji klasyfikacyjnych jest zbadanie odporności całej aparatury i urządzeń elektrycznych na oddziaływanie tak wysokich składowych harmonicznych. Jednakże, jak do tej pory klasyfikatorzy statków niewiele zrobili w zakresie monitorowania jakości energii elektrycznej na pokładach statków, a woltomierz, amperomierz i częstościomierz pozostają niezmiennie podstawowymi narzędziami diagnostycznymi w elektroenergetycznych systemach okrętowych [1], [2], [3], [4], [5]. Bardziej zaawansowane układy pomiarowe, umożliwiające analizę jakości energii elektrycznej na statku w bardzo szerokim zakresie, są wymogiem chwili.

Katedra Elektroenergetyki Okrętowej (KEO) Akademii Morskiej w Gdyni w współpracy z Inspektoratem Elektrycznym i Automatyki (IEA) Polskiego Rejestru Statków w Gdańsku rozwija opracowaną przez siebie aparaturę pomiarową jakości energii elektrycznej dążąc do rozszerzenia możliwości pomiaru jak największej gamy parametrów w możliwie najszerszym zakresie ich wielkości. Już obecnie możliwy jest pomiar większości parametrów jakości energii elektrycznej (tabela 1) określonych przez podstawową w tym zakresie normę PN-IEC 60092-101 Instalacje elektryczne na statkach Część 101: Definicje i wymagania ogólne. Nadto, możliwy jest pomiar i ocena prawidłowego rozdziału energii elektrycznej

między pracujące równolegle zespoły prądowców oraz dopuszczalnych parametrów energii elektrycznej wytwarzanej przez prądnice okrętowe, określonych w normach *IEC 60092 Część 201: Distribution Systems* i *Część 301: Equipment: Generators and Motors*. Jednocześnie aparatura umożliwia pomiary zniekształceń od składowych harmonicznych w szerokim zakresie do setnej harmonicznej, jak również przy wyższych częstotliwościach składowych, znacznie powyżej 10 kHz [6], [7], [8], [9].

Tabela 1. Dopuszczalne parametry jakości energii elektrycznej na statkach

Parametr wg 60092-101	Wartość
Tolerancja napięcia (ciągła)	+6, -10%
Asymetria napięcia	3%
Zmiana okresowa napięcia (ciągła)	2%
Składowe przejściowe napięcia	±20%
Czas powrotu składowych przejściowych napięcia	1,5 s
THD	5%
Pojedyncza harmoniczna	3%
Tolerancja częstotliwości	±5%
Zmiana okresowa częstotliwości	0,5%
Składowe przejściowe częstotliwości	±10%
Czas powrotu składowych przejściowych częstotliwości	5 s
Parametr wg 60092-201	
Rozpływ obciążeń czynnych	15%
Rozpływ obciążeń biernych	10%
Rozpływ prądów	15%

Dodatkowym problemem pojawiającym się w czasie pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej w sieciach okrętowych, jest brak jednoznacznie zdefiniowanych metod pomiarowych parametrów jakości energii elektrycznej dla tych systemów. W czasie prowadzonych badań, autorzy korzystali ze stosownych norm przewidzianych dla systemów lądowych *IEC 61000-4-30. Testing and Measurement Techniques – Power Quality Measurement Methods* [10] i *IEC 61000-4-7. General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto* [11]. Normy te nie zostały bezpośrednio przewidziane do pomiarów jakości energii elektrycznej w sieciach okrętowych, a niektóre zawarte w nich metody (zwłaszcza dotyczące metod pomiaru częstotliwości) nie powinny być stosowane do oceny jakości energii elektrycznej w rozważanej klasie systemów.

Wraz z rozwojem narzędzi pomiarowych trwają badania różnych parametrów jakości energii elektrycznej na jednostkach pływających, które powinny określić:

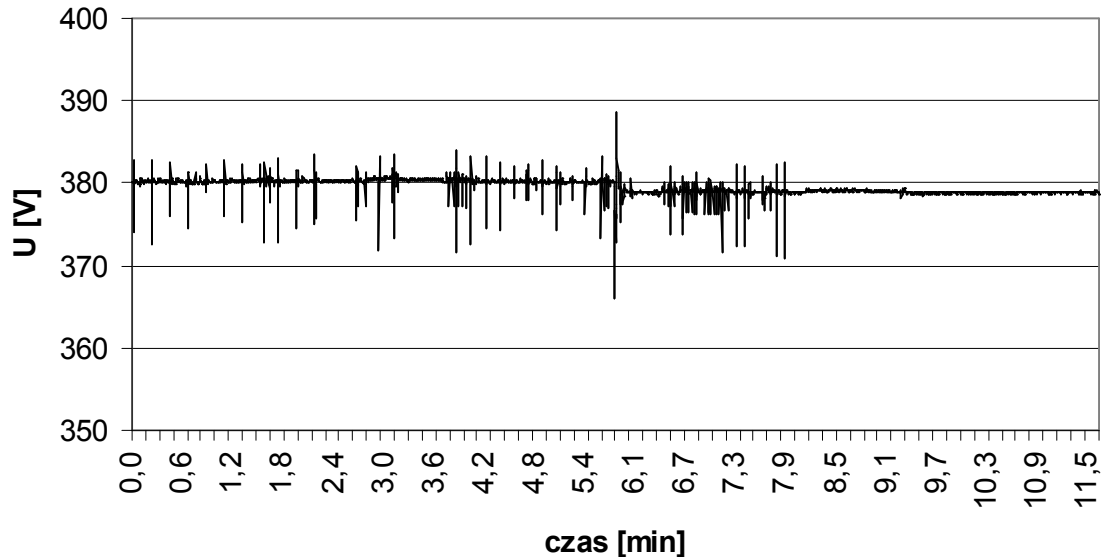
- ostateczny kształt i funkcjonalność aparatury: stałej i przenośnej,
- metody pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej,
- warunki, w jakich wymagane byłyby pomiary ciągłe,
- warunki, w jakich dopuszczalne byłyby pomiary dorywcze.

Już na obecnym etapie wydaje się, iż warto podzielić się wynikami dotychczasowych badań, pomiarów i doświadczeń.

Mniej teorii, więcej praktyki na przykładzie okrętu

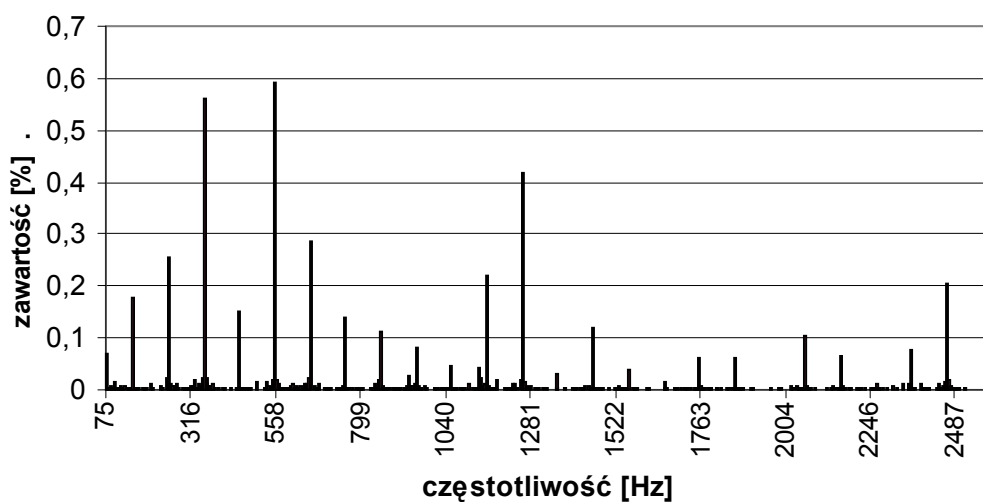
W roku 2004 zostały przeprowadzone wspólne pomiary na jednym z okrętów polskich [12]. Okręt nie posiadał większych odbiorników nieliniowych i zasadniczo nie występował na

nim problem jakości energii elektrycznej. Zmiany napięcia mieszczą się w dopuszczalnych granicach. Największą intensywność zmian wartości skutecznej napięcia zaobserwowano podczas manewrów wyjściowych i wejściowych (z i do portu). Rys. 1 przedstawia początkowe 8 minut manewrów wyjściowych oraz końcowy okres bezpośrednio po manewrach.



Rys. 1. Zmiany wartości skutecznej napięcia w czasie manewrów wyjściowych z portu

Pomiary wskaźnika *THD* oraz zawartości harmonicznych i interharmonicznych w paśmie do 3,5 kHz nie wykazały znaczących wartości zniekształceń kształtu krzywej przebiegu czasowego napięć w systemie 400 i 230 V. Zawartość harmonicznych i interharmonicznych w paśmie do ok. 2,5 kHz (do 50-tej harmonicznej włącznie) dla przypadku pracy prądnicy awaryjnej na sieć okrętową (i występującego w chwili pomiaru obciążenia) przedstawiono graficznie na rys. 2 i w tabeli 2 (wybrane harmoniczne).

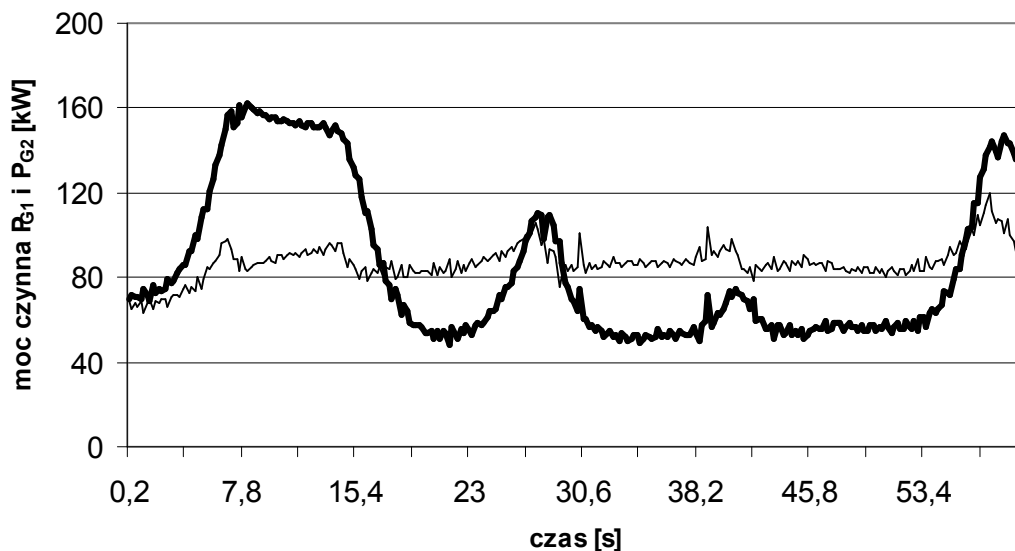


Rys. 2. Widmo amplitudowe napięcia w czasie pracy prądnicy awaryjnej w sieci 400 V

Tabela 2. Zawartość wybranych harmonicznych w sieci 400 V w czasie pracy prądnicy awaryjnej

	rzęd harmonicznej						
	5	7	11	13	17	25	49
zawartość harmonicznej [%]	0,27	0,59	0,63	0,52	0,27	0,42	0,21

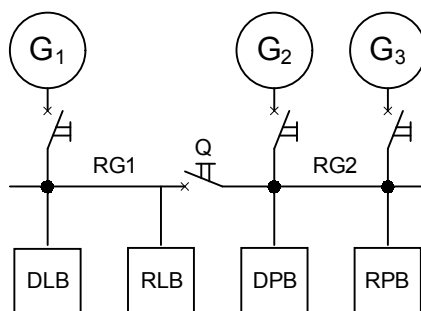
Podobnie wartość częstotliwości nieznacznie przekraczała 50,2 Hz. Największe zmiany częstotliwości (50,88 Hz) zaobserwowano w czasie przejmowania obciążenia z prądnicy awaryjnej przez wolnostojącą prądnicę rezerwową i odstawienia prądnicy awaryjnej. Zarówno asymetria napięcia, jak i rozplływ obciążeń utrzymywały się w normie. Niemniej stwierdzono pewne negatywne zjawiska związane z rozplływem obciążeń pomiędzy zespoły prądotwórcze pracujące równolegle. Rozplływ mocy biernych znajdował się na dopuszczalnej granicy 10%, a największym problemem okazał się początkowy nierównomierny rozplływ mocy czynnych zespołów prądotwórczych w stanach dynamicznych. Czas reakcji, znacznie różny dla każdej ze współpracujących prądnic podczas gwałtownych zmian obciążenia, przedstawiono na rys. 3. W początkowym okresie praktycznie całe dodatkowe obciążenie przejmuje jedna z prądnic, później dopiero następuje wyrównanie obciążeń. Linia pogrubioną oznaczono obciążenie mocą czynną P_{G2} zespołu prądotwórczego nr 2. [12]



Rys. 3. Przykładowe zmiany obciążenia mocą czynną zespołów prądotwórczych nr 1 i nr 2 w czasie manewrów wejściowych do portu

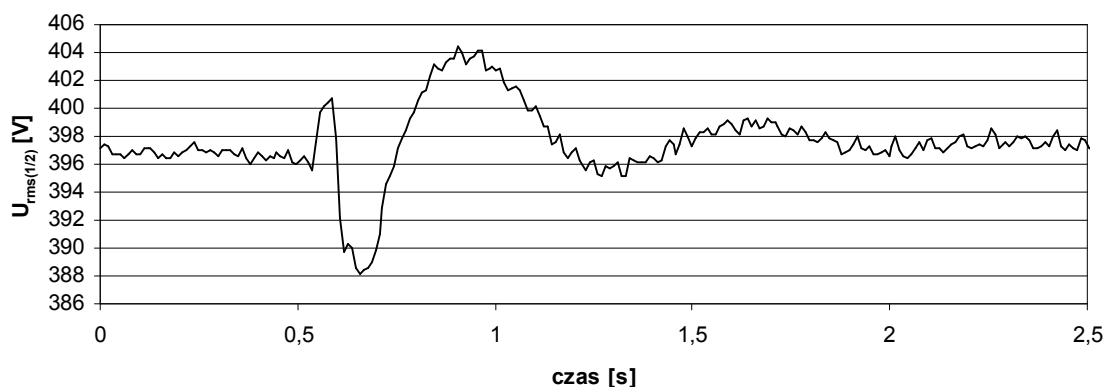
Pomiary na statku IMOR

Innym ciekawym statkiem pod względem konfiguracji elektrowni oraz charakteru obciążeń jest oddany do użytku w tym roku statek badawczy Instytutu Morskiego m/v IMOR. Schemat jego systemu wytwarzania i rozdziału energii elektrycznej przedstawia rys. 4 [13].



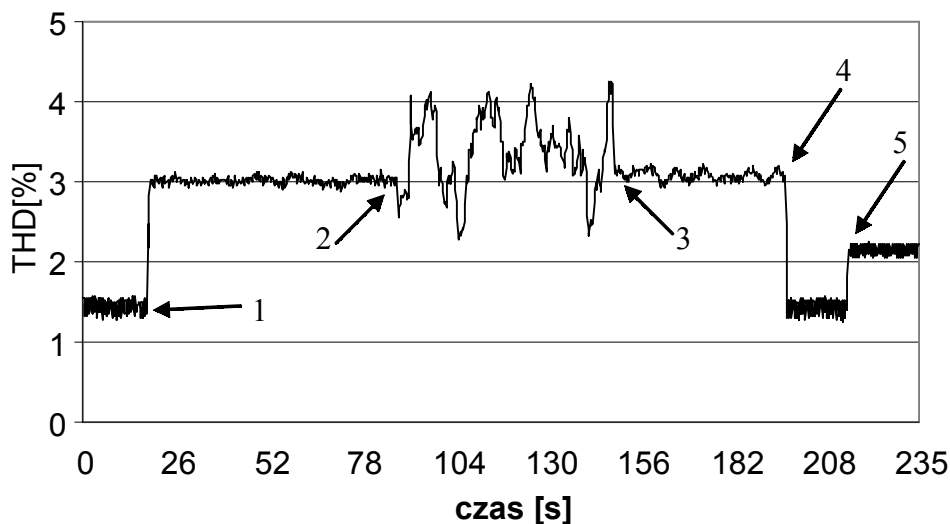
Rys. 4. Schemat elektrowni badanego statku

Napęd statku stanowią dwa silniki elektryczne zasilane za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych CXI firmy VACON o mocy 315 kW każdy. Silniki te są umieszczone na rufie i oznaczone jako *RLB* dla pędnika umieszczonego na lewej burcie oraz *RPB* dla pędnika na prawej burcie. Dodatkowo za pomocą pojedynczego bloku oznaczono dziobowe układy: falownik-pędnik azymutalny (*DLB* i *DPB* o mocy 75 kW każdy). Podstawowym źródłem energii są trzy generatory, z czego dwa o mocy 425 kVA (G_1 i G_3) oraz dodatkowo jeden o mocy 200 kVA (G_2). Jak widać, ponad 90% obciążenia stanowi moc dużych układów nieliniowych, jakimi są zarówno dwa pędniki rufowe, jak i oba pędniki dziobowe. Na badanym statku również nie stwierdzono znaczących nieprawidłowości w zakresie parametrów napięcia. Zapady, wahania oraz asymetria napięcia jak również zmiany częstotliwości utrzymywały się w normie, będąc znacznie poniżej dopuszczalnych parametrów określonych w tabeli 1. Największy zarejestrowany zapad napięcia w sieci 400 V przedstawia rys. 5, natomiast wahania i asymetria napięcia nie przekraczały 1%, a wahania częstotliwości zasadniczo nie przekraczały 2% (przy dopuszczalnych 5%).



Rys. 5. Zapad napięcia zarejestrowany w sieci 400 V

Ocenę zniekształceń napięcia zasilającego przeprowadzono przede wszystkim w zakresie zaburzeń przewodzonych niskiej częstotliwości. Zgodnie z *IEC 60533 Electrical installations in ships – Electromagnetic compatibility*, za górną granicę zakresu niskich częstotliwości przyjęto częstotliwość 10 kHz. Dodatkowo wykonano pomiary również składowych wyższych częstotliwości (do ok. 50 kHz). Zasadniczym źródłem zaburzeń na badanym statku były napędy dużej mocy (głównie pędniki rufowe) zasilane za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych. W pozostałych okresach obserwacji nie stwierdzono występowania żadnych istotnych zaburzeń. Przykładowe zmiany współczynnika THD w czasie załączania różnych napędów pokazano na rys. 5.

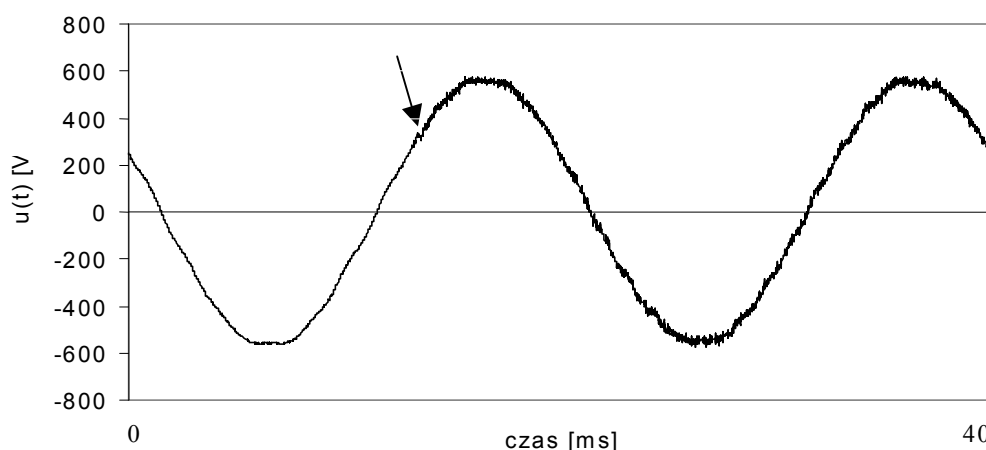


Rys. 6. Zmiany współczynnika *THD* przy zmianach konfiguracji obciążenia elektrowni okrętowej (włączanie i wyłączanie napędów)

W chwili rozpoczęcia rejestracji pracowały napędy dziobowe. Na rys. 6 oznaczono następujące zdarzenia:

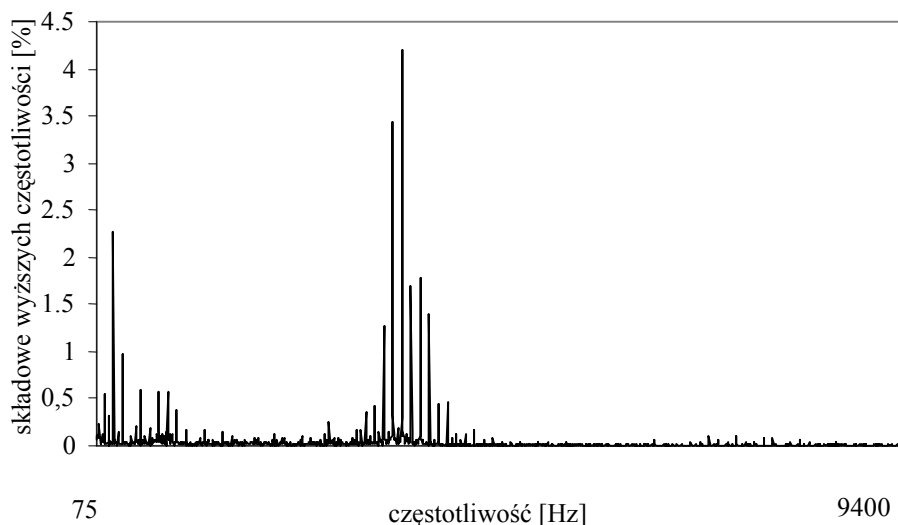
1. włączenie napędu rufowego – lewa burta
2. włączenie napędu rufowego – prawa burta
3. wyłączenie napędu rufowego – lewa burta
4. wyłączenie napędu rufowego – prawa burta
5. wyłączenie napędów dziobowych

Na podstawie wykonanych pomiarów stwierdzono, że konfiguracja napędów posiada decydujący wpływ na całkowite zniekształcenie sygnału. Przy czym wpływ pędników dziobowych jest praktycznie pomijalny. Przykładową zmianę kształtu przebiegu czasowego napięcia 400 V w chwili załączenia napędu rufowego (lewa burta) pokazano na rys. 7.



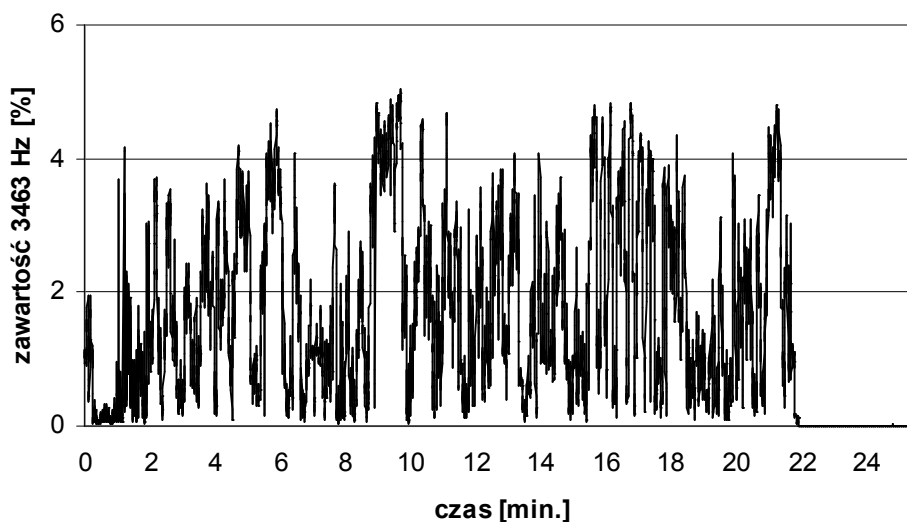
Rys. 7. Przykładowy przebieg czasowy napięcia 400 V bezpośrednio przed i po załączeniu napędu rufowego (chwile załączenia oznaczono strzałką)

Nie stwierdzono także poważniejszych zniekształceń krzywej przebiegu czasowego napięcia w zakresie częstotliwości do 50-tej harmonicznej. Przykładowe widmo częstotliwościowe napięcia w sieci 230 V pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Przykładowe widmo napięcia 230 V na statku IMOR w paśmie od 75 Hz do 9400 Hz

Na podstawie rys. 8 można stwierdzić, że pewne obawy mogą budzić składowe w paśmie częstotliwości od 50 harmonicznej do 10 kHz. Rys 9 przedstawiono przykładową zawartość składowych o częstotliwości ok. 3463 Hz w napięciu zasilającym na mostku nawigacyjnym. Zniekształcenia napięcia w tym zakresie były spowodowane pracą falowników z częstotliwością przełączania 3,5 kHz.



Rys. 9. Zmiany zawartości składowej o częstotliwości ok. 3463 Hz w napięciu zasilającym urządzenia na mostku nawigacyjnym

W rezultacie na mostku nawigacyjnym podczas pracy napędów zarejestrowano podwyższoną zawartość całkowitych zniekształceń harmoniczných napięcia. Chwilowa wartość współczynnika THD przekraczała 8%. Wyraźnie widoczne fluktuacje składowej wyższej częstotliwości pokazanej na rys. 9 spowodowały, że współczynnik THD dla 10 minutowego czasu agregacji nie był zbyt duży i wyniósł maksymalnie 4,48% (pomierzony

zgodnie z normą IEC 61000-4-30 [10]. Agregacja pomiarów realizowana jest za pomocą pierwiastka kwadratowego ze średniej arytmetycznej wielkości wejściowych podniesionych do kwadratu). Podobnie maksymalna wartość składowej o częstotliwości ok. 3463 Hz dla 10 minutowego czasu agregacji wyniosła 2,55% [13].

Wnioski

Przykłady obu jednostek pozwalają stwierdzić, iż generalnie jakość energii jest na nich poprawna. Niemniej w przypadku całkowicie zelektryfikowanego statku *IMOR* wyniki pomiarów składowych napięcia w zakresie wyższych częstotliwości potwierdzają uzyskane przez brytyjską firmę *Harmonic Solutions* wyniki pomiarów na jednostkach *offshore* [14]. Ponadto pod uwagę należy wziąć fakt, iż wyniki pomiarów pochodzą z przeglądów zasadniczych nowo wybudowanych statków. Dorywcze pomiary jakości energii dokonywane na wielu już eksploatowanych jednostkach, a prowadzone przez wymienioną firmę brytyjską, wykazują poważne przekroczenie wcześniej określonych granic, np. współczynnika *THD*, asymetrii napięcia itp. Wyniki pomiarów współczynnika *THD* na wielu jednostkach *offshore* dochodzą do wartości 30% [14]. Możliwość poprawy jakości energii na statkach z nieliniowymi odbiornikami energii, oprócz wcześniejszego już ustalenia granicznych jej parametrów, mogą dać regularne pomiary. Niektóre z instytucji klasyfikacyjnych zaczynają taką konieczność zauważać, jednak jak do tej pory to tylko Polski Rejestr Statków S.A. we współpracy z Akademią Morską w Gdyni opracował wytyczne prowadzenia tego typu pomiarów. Zostały one ustanowione w *Publikacji nr 25/P Wymagania techniczne dla okrętowych układów energoelektronicznych* i obejmują zalecenia w zakresie parametrów energii elektrycznej, wytyczne dotyczące dokumentacji oraz obliczeń, jak również wymagania konstrukcyjne i środowiskowe. Jednak szczególnie ważnym elementem publikacji jest jej ostatni rozdział zatytułowany „Próby”. Rozdział określa wytyczne prowadzenia prób u producenta i na jednostce. Większość wymagań dotyczy nowych układów energoelektronicznych i nowo wybudowanych statków. Natomiast wymaganie dotyczące statków eksploatowanych brzmi:

W trakcie eksploatacji okrętu, nie rzadziej niż co 5 lat, należy wykonywać pomiary parametrów (w tym zniekształceń) energii elektrycznej sieci okrętowej zawierającej układy energoelektroniczne, w przypadku gdy moc znamionowa największego z nich przekracza 50% mocy znamionowej jednego z zespołów prądowców, mogących go zasiląć, lub gdy moc całkowita wszystkich, zainstalowanych układów energoelektronicznych przekracza 30% mocy znamionowej elektrowni okrętowej. Analogiczne próby należy wykonywać, gdy sieć okrętowa jest zasilana za pośrednictwem przekształtnika energoelektronicznego, niezależnie od jego mocy [15].

Obecnie większość urządzeń na statkach ma charakter obwodów nieliniowych. Natomiast obwody liniowe występują coraz rzadziej, są to na przykład żarówki i grzejniki, przy czym jeśli grzejnik jest wyposażony w sterownik typu *SMPS* – *switch mode power supply*, to jego praca powoduje pogorszenie jakości energii. Armatorzy, którzy zdecydują się na poprawę jakości energii, a co za tym idzie zwiększenie niezawodności jednostki, mogą zastosować środki łagodzące wpływ harmonicznych, takie jak filtry bierne lub aktywne oraz transformatory izolacyjne.

Literatura:

- [1] ABS Rules for building and classing steel vessels 2006, Part 4 Vessel systems and machinery.
- [2] ABS Guidance notes on control of harmonics in electrical power systems.
- [3] DNV Rules for classification of ships January 2006, Part 4 Machinery and systems – Main Class.

- [4] PRS Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich 2002, Część VIII Urządzenia elektryczne i automatyka.
- [5] РМРС Правила классификации и постройки морских судов 1999, Часть VIII – Электрическое оборудование.
- [6] PN-IEC 60092-101 Instalacje elektryczne statków Część 101: Definicje i wymagania ogólne.
- [7] IEC 60092-201 Electrical installations in ships Part 201: System design – General.
- [8] IEC 60092-301 Electrical installations in ships Part 301: Equipment – Generators and motors.
- [9] Janusz Mindykowski Assessment of electric power quality in ship systems fitted with converter subsystems, Shipbuilding & Shipping, Gdańsk 2003.
- [10] IEC 61000-4-30. Testing and Measurement Techniques – Power Quality Measurement Methods.
- [11] IEC 61000-4-7. General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto.
- [12] Janusz Mindykowski, Tomasz Tarasiuk, Mariusz Szweda, Edward Szmít Raport Techniczny nr 48 Badania jakości energii elektrycznej na wybranym statku Polski Rejestr Statków, Gdańsk 2004.
- [13] Janusz Mindykowski, Tomasz Tarasiuk, Mariusz Szweda Raport z badań jakości energii elektrycznej na statku „IMOR” Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2005.
- [14] Ian C Evans The future is electric Driving ahead – the progress of electric propulsion, The Motor Ship, September 2003.
- [15] PRS Publikacja nr 25/P, Wymagania techniczne dla okrętowych układów energoelektronicznych, Gdańsk 2006.

Autorzy:

Janusz Mindykowski – prof. dr hab. inż. w dyscyplinie elektrotechnika, obecnie dziekan Wydziału Elektrycznego Akademii Morskiej w Gdyni i kierownik Katedry Elektroenergetyki Okrętowej

Edward Szmít – inż. elektryk, obecnie kierownik Inspektoratu Elektrycznego i Automatyki PRS, w przemyśle okrętowym od 1965 roku.

Tomasz Tarasiuk – dr inż. w dyscyplinie elektrotechnika, adiunkt w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej

Daniel Czarkowski – mgr inż., inspektor Polskiego Rejestru Statków S.A.