

DIAGNOSTYKA IZOLOWANEGO SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO NA PRZYKŁADZIE JEDNOSTKI PŁYWAJĄCEJ

Janusz MINDYKOWSKI¹, Tomasz TARASIUK¹, Edward SZMIT², Daniel CZARKOWSKI²

1 – Akademia Morska w Gdyni, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej;
2 – Polski Rejestr Statków S.A., Inspektorat Elektryczny i Automatyki,
al. gen. Józefa Hallera 126, fax. 346 03 92, E.Szmit@prs.pl , D.Czarkowski@prs.pl

Streszczenie

Publikacja omawia zaawansowane techniki diagnostyczne wykorzystywane do pomiarów jakości energii elektrycznej w izolowanych systemach elektroenergetycznych stosowanych na jednostkach pływających, małych wyspach, terenach zajętych przez strony walczące itp. W publikacji zawarto obserwacje poczynione podczas dotychczasowej współpracy oraz badań prowadzonych na trzech różnych obiektach pływających, z których jeden był tzw. *all electric ship*, gdzie podstawową część odbiorników energii elektrycznej stanowiły obwody nieliniowe, posiadające zasadniczy wpływ na parametry jakości energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: izolowany system elektroenergetyczny, jakość energii elektrycznej, zniekształcenia sygnałów

DIAGNOSTICS OF ISOLATED ELECTRICAL POWER SYSTEM ON EXAMPLE OF THE SHIP

Summary

Publication treats of advanced diagnostic technologies used for electrical power quality measurements in isolated electrical power systems, applied on ships, small islands, territories occupied by fighting sides, etc. Publication includes observations made during the present cooperation and tests carried out onboard three different ships, which one of them was all electric ship, where main part of power consumers were non-linear circuits having principle influence on the parameters of electrical power quality.

Keywords: isolated electrical power system, electrical power quality, waveform distortions

1. WSTĘP

Wraz z rozwojem techniki człowiekowi przestają wystarczać proste metody diagnostyczne. Jak kiedyś zegar słoneczny stał się niewystarczający do pomiaru czasu, tak dziś oceny jakości energii elektrycznej nie zapewniają takie urządzenia jak woltomierz, częstotliwościomierz lub amperomierz. Obecnie, w dobie wysokiego nasycenia okrętu elektroniką i energoelektroniką, potrzeba bardziej skomplikowanych technik i metod pomiarowych, aby ocenić właściwie parametry jakościowe energii elektrycznej. Wartości dopuszczalne tych parametrów określają dla jednostek pływających:

- cywilnych: publikacja normatywna IEC 60092-101 *Electrical installations in ships Part 101: Definitions and general requirements*
- wojennych: porozumienie standaryzacyjne STANAG 1008 *Characteristics of Shipboard Electrical Power Systems in Warships of the North Atlantic Treaty Navies*

Tablica 1 przedstawia porównanie dopuszczalnych wartości wybranych parametrów jakości energii zawartych w wymienionych dokumentach.

Tablica 1

Parametr	60092-101	STANAG 1008
Tolerancja napięcia (ciągła)	+6, -10%	±5% (±6%)
Asymetria napięcia	3%	2%
Składowe przejściowe napięcia	±20%	±16% (±20%)
Czas powrotu składowych przejściowych napięcia	1,5 s	2 s
THD	5%	5%
Pojedyncza harmoniczna	3%	3%
Tolerancja częstotliwości	±5%	±3%
Składowe przejściowe częstotliwości	±10%	±4% (±5,5%)
Czas powrotu składowych przejściowych częstotliwości	5 s	2 s

W kolumnie STANAG 1008 podano w nawiasach wyższe wartości kilku parametrów, dopuszczone pod pewnymi warunkami. W przypadku parametrów związanych z napięciem nie ma tak dużych różnic między oboma aktami normatywnymi, jakie występują w związku z częstotliwością.

Tablica 2 przedstawia parametry jakości energii związane z rozplywem obciążeń. Tablicę 2 opracowano na podstawie jednakowych wymagań określonych zarówno w *Przepisach Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich*, jak i *Przepisach Nadzoru i Budowy Okrętów RP* opracowanych przez Polski Rejestr Statków S.A. [1] [2].

Tablica 2

Parametr	Wartość
Rozplyw obciążeń czynnych	15%
Rozplyw obciążeń biernych	10%
Rozplyw prądów	15%

Prace nad wyposażeniem umożliwiającym szczegółową ocenę jakości energii i wyeliminowanie ewentualnych zagrożeń prowadzi Katedra Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni przy współdziałaniu Polskiego Rejestru Statków S.A. w Gdańsku. W ramach wspólnie prowadzonych pomiarów na kilku budowanych obiektach, zarówno okrętach Marynarki Wojennej RP, jak i statkach cywilnych, stwierdzono, że chociaż znaczne odchylenia parametrów energii elektrycznej od ich wartości nominalnych nie występują zbyt często, to jednak pomiary takie mogą już teraz przyczyniać się do poprawy mniej widocznych, ale równie istotnych szczegółów. Warto jednak zauważyć, że wraz z postępującym wzrostem zastosowań nieliniowych odbiorników wielkiej mocy, jakimi są okrętowe napędy główne oraz stery strumieniowe, wzrosło znaczenie właściwej jakości parametrów energii jako czynnika podstawowego dla bezpieczeństwa jednostki pływającej.

2. OD ZABURZEŃ ENERGII DO KATASTROF MORSKICH

2.1 Zniekształcenia przyczyną uszkodzeń w sieciach energetycznych

Zniekształcenia od składowych wyższych częstotliwości wywołują następujące typowe uszkodzenia większości elementów i podzespołów okrętowych instalacji elektrycznych:

- **źródeł energii elektrycznej:**
 - przegrzanie oraz trwałe uszkodzenia łożysk, izolacji blach i uzwojeń prądnic, spowodowane m.in. starzeniem termicznym materiałów elektroizolacyjnych,
- **odbiorników energii elektrycznej:**
 - przegrzanie stojana i wirnika silników elektrycznych o stałej prędkości obrotowej, ryzyko uszkodzenia łożysk zależne od stopnia nagrza-

nia wirnika, dodatkowe przyrosty temperatury izolacji i jej przyspieszone starzenie termiczne. Szczególne zagrożenie występuje w przypadku silników w wykonaniu przeciwwybuchowym 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.
- **sieci przesyłowych energii elektrycznej:**
 - przegrzanie kabli oraz dodatkowe zagrożenie wystąpienia uszkodzeń z powodu zjawiska rezonansu, obniżona zdolność przewodzenia prądów znamionowych z powodu „zjawiska naskórkowości”, zmniejszającego skuteczną wartość przekroju kabli,
 - przegrzanie oraz przedwczesne starzenie izolacji blach i uzwojeń transformatorów. [3]

2.2 Synergia pogłębia efekt

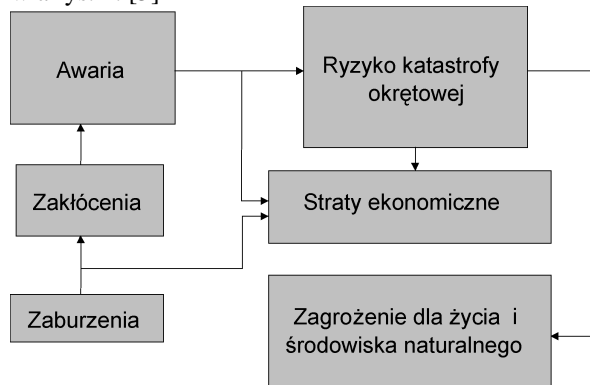
Wzajemne oddziaływanie kilku zaburzeń może spotęgować poziom zakłóceń występujących w sieci elektroenergetycznej. W tym zakresie baczna uwaga należy zwracać na szczególnie powszechne we współczesnych układach elektroenergetycznych następujące zaburzenia:

- **zniekształcenia krzywej przebiegu w czasie napięcia,**
- **odchylenia od wartości skutecznej napięcia,**
- **niesymetrię napięcia.**

Znacznie wyższy poziom zakłóceń prowadzi w prosty sposób do degradacji izolacji urządzeń zainstalowanych w systemie zasilania a w rezultacie powoduje ich przyspieszone zużycie. W wyniku zakłóceń mogą następować też uszkodzenia lub wręcz poważne awarie systemu elektroenergetycznego [4]. Badania wykonane w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej wykazały, że zasilanie typowych silników indukcyjnych napięciem o parametrach granicznych określonych w tablicy 1 może doprowadzić w stosunkowo krótkim czasie do uszkodzenia tych silników. Przykładowo dla zaburzeń o parametrach $f=103,7\%$ $f_n=51,85$ Hz, $U_{rms}=99,2\%$ $U_n=377$ V i THD=12,45% (dominują harmoniczne nieparzyste niepodzielne przez 3, zwłaszcza piąta) zmierzono dodatkowy przyrost temperatury o 11 K [5], podczas gdy dla klasy izolacji F dodatkowy przyrost temperatury o 9,3 K powoduje dwukrotne przyspieszenie starzenia termicznego izolacji [9]. Warto dodać, że przyjęte poziomy zaburzeń były wcześniej obserwowane w okrętowych systemach elektroenergetycznych.

2.3 Od zaburzeń do strat

Zaburzenia często powodujące zakłócenia w wielu wypadkach prowadzą do awarii. Od awarii na morzu prowadzi już prosta droga do katastrofy okrętowej. Co oznaczają niewłaściwa jakość energii elektrycznej i związane z nią zakłócenia, przedstawia rys. 1. [5]



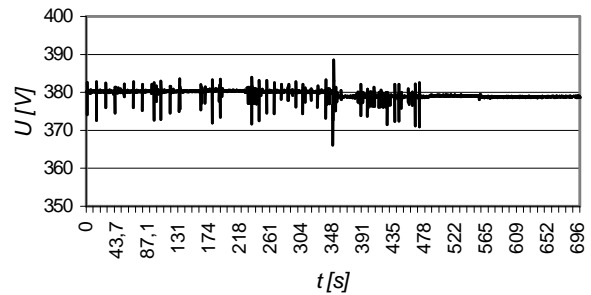
Rys. 1 Droga od zaburzeń do katastrofy okrętowej i strat z nią związanych

3. BADANIA JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA JEDNOSTKACH PŁYWAJĄCYCH

W ciągu kilkuletniej współpracy przedstawiciele Katedry Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni oraz Inspektoratu Elektrycznego i Automatyki Polskiego Rejestru Statków S.A. w Gdańsku przeprowadzili pomiary jakości energii elektrycznej na jednostkach sklasyfikowanych przez PRS S.A. Niezależnie pracownicy naukowci Akademii Morskiej w Gdyni przeprowadzili badania na wielu statkach klasyfikowanych przez inne instytucje klasyfikacyjne. W rozdziale tym przedstawiono wybrane wyniki pomiarów podstawowych parametrów jakości energii na dwóch jednostkach sklasyfikowanych przez PRS S.A. Zaprezentowano również ciekawsze wyniki pomiarów uzyskane przez naukowców z Akademii Morskiej w Gdyni na innych statkach.

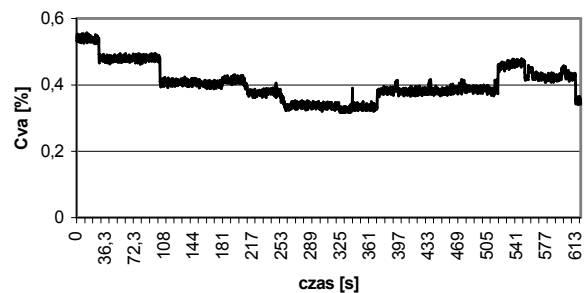
3.1 ORP „Kontradmiral X. Czernicki”

Jedną z pierwszych jednostek poddanych pomiarom jakości energii elektrycznej był ORP „Kontradmiral X. Czernicki” – okręt, na którym nie występują odbiorniki nieliniowe o większej mocy. W czasie pomiarów nie stwierdzono zaburzeń napięcia zasilającego o poziomach przekraczających dopuszczalne granice. Okresem o największej intensywności zmian wartości skutecznej napięcia były manewry wyjściowe z portu i wejściowe do portu. Przykładowe zmiany wartości skutecznej napięcia w czasie manewrów wyjściowych okrętu (początkowe 470 s) oraz okres bezpośrednio po manewrach (końcowe 230 s) przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2 Zmiany wartości skutecznej napięcia w czasie manewrów wyjściowych i wejściowych z portu

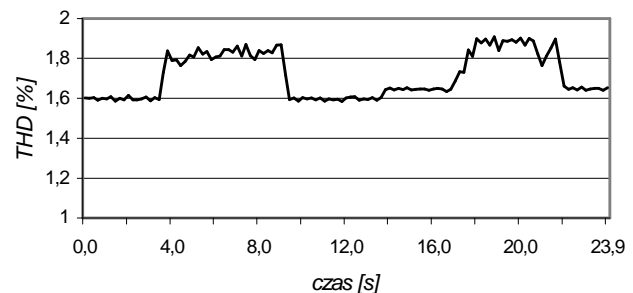
Obserwowane zmiany napięcia mieściły się w dopuszczalnych granicach. Dodatkowo na badanym okręcie nie stwierdzono znaczącej niesymetrii napięcia, zarówno w sieci 380 V, jak i 220 V. Wskaźnik niesymetrii napięciowej C_{va} , opisujący maksymalne odchylenie napięcia międzyfazowego od wartości średniej napięć międzyfazowych, przyjmował większe wartości w przypadku sieci 220 V. Przykładowe zmiany tego wskaźnika pokazano na rys. 3.



Rys. 3 Zmiany wskaźnika niesymetrii napięciowej C_{va} przy zmianach obciążenia w sieci 220V

W czasie badań wykonano pomiary wskaźnika THD oraz zawartości harmonicznych i interharmonicznych w paśmie do 3,5 kHz. Jednak nie stwierdzono znaczących wartości zniekształceń kształtu krzywej przebiegu czasowego napięć w badanym systemie 380 i 220V.

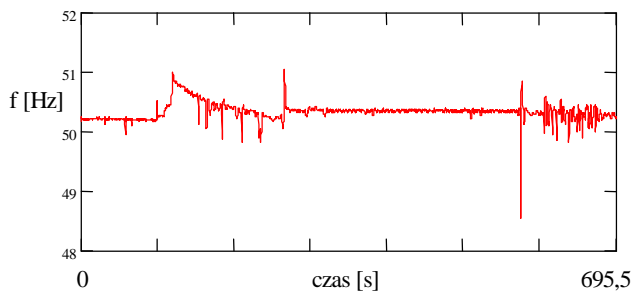
Analiza zniekształceń napięcia w sieci 220 V wykazała podobny poziom zniekształceń, zmieniający się w zakresie 1,45–1,9% w zależności od obciążenia. Przykładowe zmiany współczynnika zniekształceń THD przy zmianach obciążenia pokazano na rys. 4.



Rys. 4 Zmiany współczynnika THD w czasie zmian obciążenia w sieci 220 V

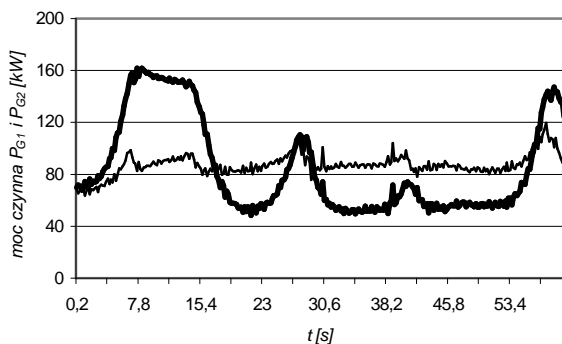
Średnia wartość częstotliwości na badanym obiekcie nieznacznie przekraczała 50,2 Hz. Zmiany częstotliwości obserwowane są jedynie w czasie zmian obciążenia elektrowni okrętowej. Zmiana konfiguracji elektrowni posiadała pomijalnie mały wpływ na średnią wartość częstotliwości.

Największe obserwowane zmiany częstotliwości wystąpiły w czasie przejmowania obciążenia z prądnicy awaryjnej przez prądnicę wolnostojącą i odstawienia prądnicy awaryjnej (rys. 5). Wówczas zaobserwowano średnią wartość częstotliwości 50,88 Hz w czasie 5 s. Podobnie rozplływ obciążeń był w granicach określonych wymienioną normą.



Rys. 5 Zmiany częstotliwości w systemie elektroenergetycznym w czasie zmiany konfiguracji elektrowni okrętowej

Wydaje się że na badanym okręcie problem zaniżonej jakości energii nie występuje. Jednakże stwierdzono kilka niepokojących zjawisk związanych z rozplływem obciążeń pomiędzy równoległe pracujące zespoły prądowców. Zaobserwowany rozplływ mocy biernych był na poziomie zbliżonym do dopuszczalnego, tj. 10%. Natomiast największym problemem było zjawisko początkowego nierównomiernego obciążenia mocą czynną zespołów prądowców w stanach dynamicznych. Stwierdzono, że w czasie gwałtownych zmian obciążenia czas reakcji jest znacząco różny dla każdej ze współpracujących prądnic. Proces ten pokazano na rys. 6, linią pogrubioną oznaczono obciążenie czynne P_{G2} zespołu prądowczego nr 2.

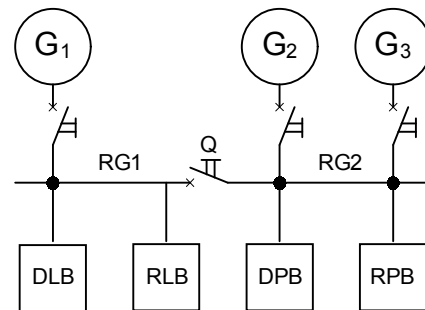


Rys. 6 Przykładowe zmiany obciążenia mocą czynną zespołów prądowców nr 1 i nr 2 w czasie manewrów wejściowych do portu

Ostatecznie zalecono sprawdzenie funkcjonowania regulatorów prędkości obrotowej silników napędowych prądnic [6].

3.2 e-m/v IMOR

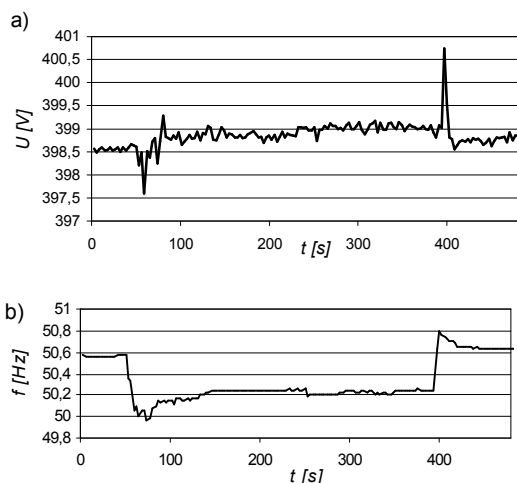
Kolejną jednostką poddaną badaniom był tzw. *all electric ship* – całkowicie zelektryfikowany statek naukowo-badawczy Instytutu Morskiego w Gdańsku „IMOR”. Napęd statku stanowią dwa silniki elektryczne zasilane za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych CXI firmy VACON o mocy 315 kW każdy. Silniki te są umieszczone na rufie i oznaczone na rys. 7 jako *RLB* dla pędnika umieszczonego na lewej burcie oraz *RPB* dla pędnika na prawej burcie. Za pomocą pojedynczego bloku oznaczono układ falownik – pędnik azymutalny.



Rys. 7 Schemat blokowy układu elektroenergetycznego na jednostce IMOR.

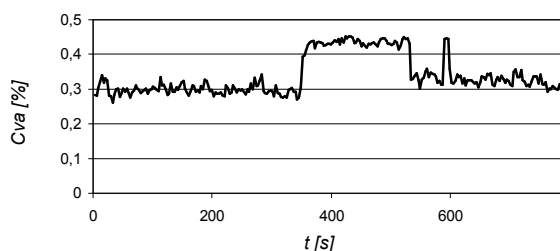
W celu zwiększenia manewrowości statku dodatkowo katamaran jest wyposażony w dwa pędniki o mocy 72 kW każdy umieszczone na dziobie – na schemacie oznaczone jako *DLB* oraz *DPB*. Podstawowym źródłem energii są trzy generatory, z czego dwa o mocy 425 kVA (G_1 i G_3) oraz dodatkowo jeden o mocy 200 kVA (G_2). Charakterystyczną cechą dla katamaranów są dwa pływaki z własnymi rozdzielnicami głównymi RG_1 oraz RG_2 , które są rozdzielone wyłącznikiem Q . Dzięki takiemu układowi zostaje zwiększona niezawodność jednostki. W przypadku zalania jednego pływaka, wyłączenia z eksploatacji jednej z rozdzielnic, statek wciąż jest manewrowalny.

Szczególnie interesujące wyniki spodziewano się uzyskać w czasie działania napędów elektrycznych statku, wprowadzających do sieci jako obwody nieliniowe pewne zaburzenia elektromagnetyczne. W trakcie badań okazało się jednak, że generalnie jakość energii elektrycznej na badanej jednostce była poprawna. Największe zmiany napięcia i częstotliwości zaobserwowano w sieci 400 V, podczas jazdy morskiej w czasie zmiany prędkości statku, co zostało pokazane na rys. 8.



Rys. 8 Zmiany napięcia U (a) i częstotliwości f (b) w sieci 400 V w czasie zmiany prędkości statku (jazda w morzu)

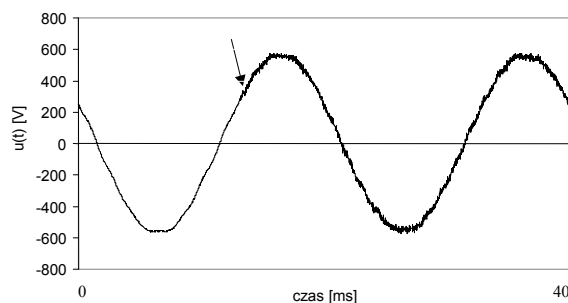
Na badanej jednostce nie stwierdzono znaczącej niesymetrii napięcia, zarówno w sieci 400 V, jak i 230 V. W przypadku sieci 230 V wskaźnik C_{va} zmieniał się w przedziale 0,15-0,48, w zależności od obciążenia (rys. 9), natomiast w sieci 400 V ten wskaźnik przyjmował podobne wartości 0,21-0,42.



Rys. 9 Zmiana wskaźnika niesymetrii napięciowej C_{va} w czasie jazdy w morzu przy zmianie obciążenia w sieci 230 V

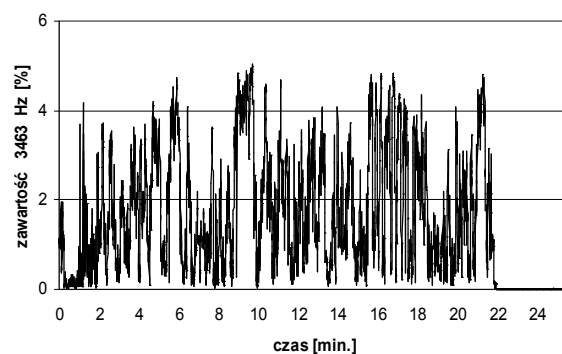
Ze względu na charakter zainstalowanych odbiorników szczególnie interesująca była ocena zniekształceń prądów i napięć na badanym statku. Moc zainstalowanych przekształtników była niewiele niższa od całkowitej mocy elektrowni okrętowej. Ocenę zniekształceń napięcia zasilającego przeprowadzono przede wszystkim w zakresie zaburzeń przewodzonych niskiej częstotliwości. Zgodnie z IEC60533 *Electrical installations in ships – Electromagnetic compatibility* za górną granicę zakresu niskich częstotliwości przyjęto 10 kHz. Pomiary przeprowadzono, w czasie przełączania napędów, dla napięć 400 V i 230 V na szynach rozdzielnic głównej oraz dla napięcia zasilającego 230 V urządzenia na mostku nawigacyjnym, ze względu na największe ryzyko wystąpienia zakłóceń (koncentracja urządzeń wrażliwych na zaburzenia). Jak wcześniej wspomniano, zasadniczym źródłem zaburzeń na badanej jednostce były napędy dużych mocy (głównie pędniki rufowe) zasilane

z przekształtników energoelektronicznych. Na rys. 10 pokazano zmianę kształtu przebiegu czasowego napięcia 400 V w chwili załączenia napędu rufowego z lewej burty. Wyraźnie widoczny jest wpływ pracy przekształtnika na kształt krzywej napięcia w rozważanym systemie. Należy jeszcze dodać, że w analizowanym przypadku napęd był nieobciążony.



Rys. 10 Przykładowy przebieg czasowy napięcia 400 V bezpośrednio przed i po załączeniu napędu rufowego (chwilę załączenia oznaczono strzałką)

Pewien niepokój mogą budzić jedynie składowe w paśmie 3,2-3,7 kHz oraz niektóre pasma powyżej częstotliwości 10 kHz, przy czym zaburzenia te są niesymetryczne. Rys. 11 ukazuje zmiany składowej o częstotliwości ok. 3463 Hz w czasie jazdy morskiej i manewrów wejściowych statku do portu. Pomiary wykonano na szynach rozdzielnic na mostku nawigacyjnym dla napięcia 230 V. Maksymalna obserwowana wartość składowej 3463 Hz, zmierzona dla okna pomiarowego równego 10 okresom analizowanego napięcia, wyniosła 5,03%. Zaburzenia w paśmie 3,2-3,7 kHz były spowodowane pracą przekształtników o częstotliwości przełączania 3,6 kHz (według danych producenta).

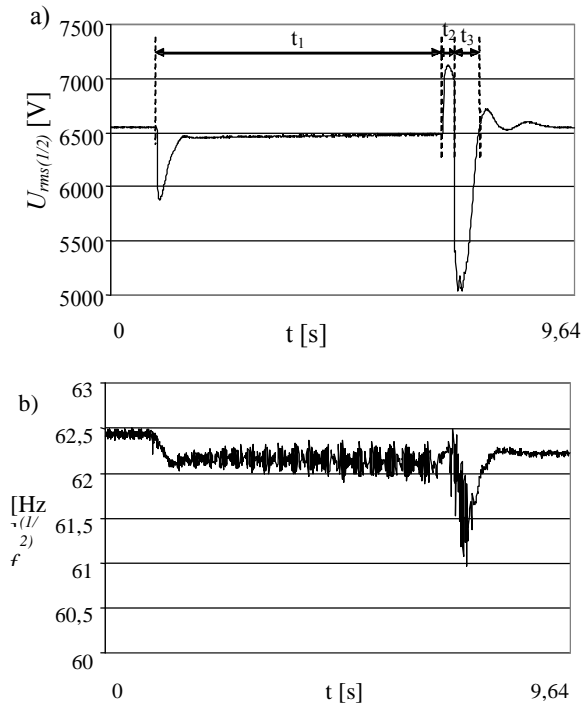


Rys. 11 Zmiany zawartości składowej o częstotliwości ok. 3463 Hz w napięciu zasilającym urządzenia na mostku nawigacyjnym

Po przeprowadzeniu badań zalecono m.in. zastosowanie filtrów RFI (dla składowych powyżej 10 kHz) oraz rozważenie zastosowania różnych częstotliwości przełączania dla napędów rufowych. [7]

3.3 m/s WAWEL

Trzecia jednostka poddana badaniom to prom m/s Wawel z systemem o napięciu nominalnym 6,6 kV i częstotliwości 60 Hz. Największe zmiany wartości napięcia i częstotliwości, związane z procesem rozruchu sterów strumieniowych, zaobserwowano w czasie manewrów wejściowych do portów. Najgorszy przypadek zmian U_{rms} pokazano na rys. 12.



Rys. 12 Zmiany napięcia $U_{rms(1/2)}$ (a) i częstotliwości $f_{(1/2)}$ (b) w czasie wybranego procesu łączeniowego – rozruch silnika napędowego steru strumieniowego; $t_1 = 5970$ ms, $t_2 = 225$ ms, $t_3 = 542$ ms

Przedstawiony zapad napięcia przyjmował wartości przekraczające te określone stosownymi normami (patrz Tablica 1) i wyniósł 23%.

Ustalono iż wskazana jest analiza rozruchu, zwłaszcza należy sprawdzić dobór czasów poszczególnych faz rozruchu do charakteru procesu [8].

4. PODSUMOWANIE

Inspektorat Elektryczny i Automatyki Polskiego Rejestru Statków w ramach współpracy z Katedrą Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni zamierza wprowadzić obowiązek monitorowania sieci elektroenergetycznych jednostek pływających. Monitorowanie jakości energii elektrycznej zapewni niezawodność systemu zasilania. Kontrola, rejestracja i analiza parametrów jakości energii niezbędnych do prawidłowego działania systemu elektroenergetycznego mogą zapobiegać awariom, a ponadto powinny uprościć planowanie remontów i przyczynić się do oszczędności paliwowych.

Jednocześnie rozwój nowoczesnych technik pomiarowych i dostępność coraz bardziej zaawansowanych technologicznie narzędzi pomiarowych sprawiają, że tego rodzaju monitoring jest obecnie możliwy i relatywnie tani.

LITERATURA

- [1] PRS S.A., *Przepisy Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich Cz. VIII*; PRS, Gdańsk 2002.
- [2] PRS S.A., *Przepisy Nadzoru i Budowy Okrętów RP Cz. VIII*; MON Warszawa 2006.
- [3] E. Szmit, J. Mindykowski, T. Tarasiuk. *Jakość energii elektrycznej na statkach wspólnym problemem armatorów, stoczni, uczelni morskich i towarzystw klasyfikacyjnych*, Jakość energii elektrycznej, SEP, Gdańsk 2004, s. 23-30/
- [4] J. Mindykowski, E. Szmit, T. Tarasiuk, *Electric Power Quality and Ship's Safety*; Polish Academy of Sciences, Branch in Gdańsk Marine Technology Transactions, Vol. 15, Gdańsk 2004, s. 351-360.
- [5] P. Gnaciński, J. Mindykowski, T. Tarasiuk, *Thermal Phenomena in Electric Machines in the Wake of Electric Power Quality in Ships' Networks*. 8th International Conference „Electrical Power Quality and Utilization”, Cracow September 21-23, 2005, s. 399-404.
- [6] J. Mindykowski, T. Tarasiuk, M. Szweđa, E. Szmit, *Badania jakości energii elektrycznej na wybranym statku*, PRS Raport Techniczny Nr 48, Gdańsk 2004.
- [7] J. Mindykowski, T. Tarasiuk, M. Szweđa: *Raport z badań jakości energii elektrycznej na statku „IMOR”*; Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2005.
- [8] J. Mindykowski, T. Tarasiuk, M. Szweđa: *Analiza zmienności napięcia i częstotliwości na statku m/s WAWEL*; Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2005.
- [9] E. L. Brancato, *Estimation of lifetime expectation of motor*, IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 1992, Vol 8 no 3, s. 5-13.

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

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

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

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