

## WSPÓŁPRACA ODBIORNIKA NIELINIOWEGO Z FILTREM AKTYWNYM I ROZDZIELNICĄ GŁÓWNA LABORATORIUM ELEKTROENERGETYKI OKRĘTOWEJ

### THE COOPERATION OF NON-LINEAR LOAD WITH ACTIVE FILTER AND THE MAIN SWITCHBOARD OF MARINE POWER ENGINEERING LABORATORY

**Mariusz Górniak, Andrzej Piłat\***

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Elektryczny,  
Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, e-mail: a.pilat@we.am.gdynia.pl

\* Adres do korespondencji/Corresponding author

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wykonanych w Laboratorium Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni. Badania obejmowały pomiar napięć na szynach głównych rozdzielnicy i prądów odbiorników przy obciążeniu modelu rozdzielnicy okrętowej przez odbiorniki liniowe oraz nieliniowe, dla jednej i dwóch prądnic pracujących równolegle na szynie z dołączonym filtrem aktywnym firmy MEDCOM z serii FA3-10k. Zaprezentowano przebiegi chwilowe napięć i prądów dla wspomnianych konfiguracji rozdzielnicy wraz z parametrami opisującymi jakość energii elektrycznej. Celem pracy było sprawdzenie możliwości współpracy równoległego filtra aktywnego z laboratoryjnym modelem okrętowego systemu elektroenergetycznego, jak również praktyczne wykorzystanie modelu do prowadzenia zajęć dydaktycznych. W wyniku badań potwierdzono skuteczność działania filtra w kompensacji harmonicznych wyższych rzędów, występujących podczas pracy odbiornika nieliniowego w ww. okrętowej sieci elektroenergetycznej.

**Słowa kluczowe:** jakość energii elektrycznej, filtr aktywny, okrętowy system elektroenergetyczny.

**Abstract:** This paper presents the results of experimental research carried out at the Laboratory of Marine Power Engineering in Gdynia Maritime University. The studies included the measurement of voltages on the main switchboard busbars and loads currents during the work of linear and nonlinear receivers for one and two generators working in parallel with MEDCOM active filter FA3-10k series. In the paper the wave forms of voltages and currents, for above mentioned switchboard configurations, are presented, along with the power quality parameters. The main purpose of the paper is to investigate the possibility of working parallel active filter with the laboratory model of marine power system as well as practical use of the model to conduct didactic activities. As the result of the research, the effectiveness of the active filter in higher harmonic compensation during operation of the nonlinear load in the above-mentioned marine power network was confirmed.

**Keywords:** power quality, active filter, marine electric power system.

## 1. WSTĘP

Dynamiczny rozwój energoelektroniki skutkuje tym, iż przekształtniki energoelektroniczne są elementami powszechnie stosowanymi na współczesnych statkach morskich, szczególnie w przypadku napędów głównych, sterów strumieniowych, ale również pomp i wentylatorów. Przekształtniki energoelektroniczne dużych mocy powodują zniekształcenia prądów i napięć w okrętowym systemie elektroenergetycznym. Występujące zniekształcenia wiążą się z pogorszeniem parametrów jakości energii elektrycznej, co może prowadzić do uszkodzenia ważnych odbiorników, od których zależy sterowność i manewrowość statku, a w konsekwencji doprowadzić do uszkodzenia jednostki, zagrożić bezpieczeństwu przewożonego ładunku lub w skrajnych przypadkach może skutkować utratą zdrowia i życia załogi [Tarasiuk i in. 2014].

W okrętowych systemach elektroenergetycznych często zachodzi konieczność przebudowy lub zmiany konfiguracji systemu elektroenergetycznego. Wymiana, załączenie lub wyłączenie w dowolnej chwili czasowej odbiornika nieliniowego dużej mocy niesie za sobą niepewność poprawnej pracy części systemu elektroenergetycznego, w którym pojawiają się zniekształcenia napięć i prądów. Największy problem stanowią harmoniczne prądu, ponieważ to one wywołują większość negatywnych skutków w okrętowym systemie elektroenergetycznym. W związku z tym należy zabezpieczać się przed skutkami zniekształceń występującymi w sieci. Stosując różnego rodzaju rozwiązania, trzeba zwrócić szczególną uwagę na ich kompatybilność elektromagnetyczną tak, aby uniknąć awarii lub generowania zakłóceń do sieci elektroenergetycznej lub innych odbiorników [Czornik i Łukiewski 2015].

Istnieje wiele metod pozwalających na eliminację i ograniczenia harmonicznych pochodzących od prądów przekształtnika [Hanzelka 2014]. Najprostszy urządzeniami ograniczającymi harmoniczne są dławiki włączone szeregowo w obwód prądowy, które powodują tłumienie harmonicznych wysokich rzędów. Innym sposobem eliminowania harmonicznych jest stosowanie pasywnych filtrów LC. Filtry tego typu skutecznie zmniejszają zawartość tylko kilku harmonicznych, na które zostały zaprojektowane. Filtry pasywne stanowią duży i kosztowny element kompensacji harmonicznych. W przypadku kompensacji pojedynczych harmonicznych ich liczba odpowiada liczbie kompensacji filtrowanych harmonicznych.

Do bardziej zaawansowanych urządzeń zaliczane są filtry aktywne, które z kolei są droższymi rozwiązaniami. Zasada działania tych układów energoelektronicznych polega na eliminacji z prądów odbiornika tych składowych, które nie są prądem czynnym składowej podstawowej. Układ filtra aktywnego, realizujący zasadę aktywnej filtracji, generuje przebieg czasowy prądu będącego w przeciwfazie względem niepożądanego składowego w prądzie odbiornika, w konsekwencji

czego prąd pobierany z generatora uzyskuje przebieg sinusoidalny [Bałkowski 2016].

Oprócz stosowania filtrów pasywnych i aktywnych wykorzystuje się również inne rozwiązania techniczne skutkujące ograniczeniem występowania harmonicznych. Dotyczy to np. odpowiedniej konfiguracji w strukturze odbiornika poprzez stosowanie w przekształtniku układów wielopulsowych (przekształtniki pulsowe – 12- i 24-pulsowe) lub zwiększenie częstotliwości przełączania tranzystorów w metodzie PWM. Jedynym ograniczeniem dla podniesienia częstotliwości przełączania tranzystora w przekształtniku jest moc odbiornika. Im większa moc odbiornika, tym mniejsza częstotliwość przełączania tranzystorów [Tarasiuk, Guerrero i Shanta 2016]. W celu większej efektywności eliminacji częstotliwości wyższych rzędów coraz częściej buduje się hybrydowe układy filtrów, czyli połączenie filtrów pasywnych z filtrami aktywnymi.

Na rynku dostępna jest szeroka gama filtrów aktywnych szeregowych i równoległych, które są najbardziej efektywnym sposobem eliminacji odkształceń w sieciach elektroenergetycznych. Tu dysponowano równoległym filtrem firmy MEDCOM z serii FA3-10k o mocy 10 kVA. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, ukazujących wpływ wymienionego filtra na jakość energii elektrycznej w laboratoryjnym modelu okrętowej sieci elektroenergetycznej obciążonej odbiornikiem nieliniowym.

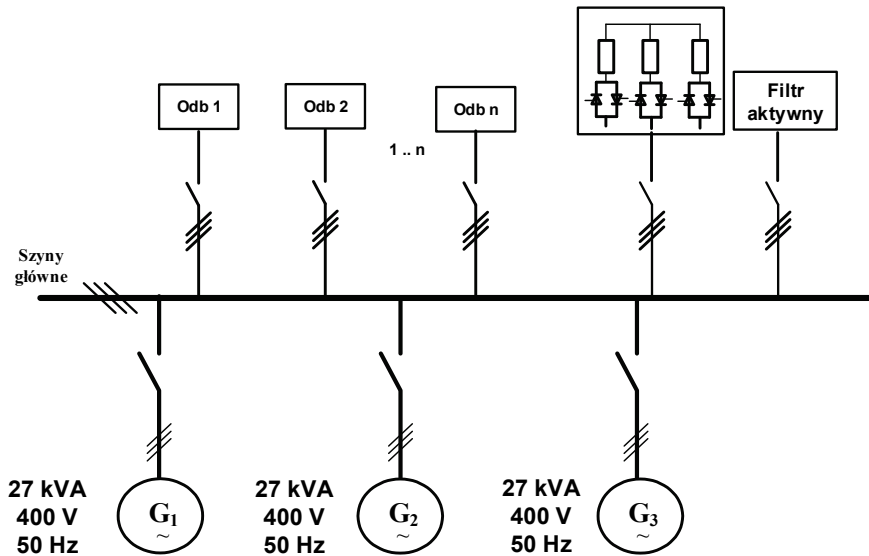
Celem badań była weryfikacja możliwości i jakości współpracy równoległego filtra aktywnego z laboratoryjnym systemem elektroenergetycznym statku, dostępnym w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni. Testy przeprowadzono dla jednej i dwóch prądnic, pracujących równolegle na szynach ( $2 \times 27$  kVA). Końcowym efektem będzie modernizacja programu laboratorium z przedmiotu *Jakość energii elektrycznej*. Podczas badań sprawdzono jakość korekcji zniekształceń napięcia na szynach rozdzielniczy głównej podczas pracy odbiornika nieliniowego, jak i wpływ filtra na poziom zniekształceń napięcia, w przypadku, gdy na szynach nie jest załączony odbiornik nieliniowy. Wyniki badań przedstawiono w formie przebiegów wartości chwilowych, a także jako zbiór parametrów, opisujących jakość energii elektrycznej.

## 2. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO OBIEKTU

Rozdzielnica okrętowa (RG 103A) w laboratorium AM w Gdyni składa się z trzech jednakowych jawnobiegunowych prądnic synchronicznych GCf84a/4 firmy ELMOR o mocy 27 kVA, o napięciu znamionowym 400 V i częstotliwości znamionowej 50 Hz.

Schemat blokowy rozdzielniczy przedstawiono na rysunku 1. Prądnice napędzane są przez elektryczne silniki prądu stałego, sterowane w taki sposób, aby ich praca zbliżona była do pracy silników Diesla, używanych w napędzie klasycznym prądnic okrętowych.

Sieć elektroenergetyczna rozdzielniczy jest siecią z izolowanym punktem neutralnym. Obciążenie elektrowni stanowią odbiorniki czystorezystancyjne. Natomiast trójfazowy odbiornik nieliniowy obejmuje trzy jednakowe rezystory, zasilane przez sterowany dwukierunkowy łącznik tyrystorowy.



**Rys. 1.** Schemat blokowy laboratoryjnej rozdzielniczy okrętowej

**Fig. 1.** The block diagram of the ship's power system in the laboratory

Jako urządzenie zabezpieczające przed skutkami zniekształceń prądów wykorzystano filtr aktywny z serii FA3-10k. Filtr aktywny jest urządzeniem trójfazowym włączanym równoległe do odbiornika.

Najważniejsze parametry znamionowe filtra umieszczono w tabeli 1. Filtr ma za zadanie utrzymanie prądu pobieranego z sieci jako najbardziej zbliżonego do sinusoidy. Zastosowanie filtra aktywnego przyczynia się do zmniejszenia szczytowej wartości prądu pobieranego z sieci, zmniejszenia wartości skutecznej prądu pobieranego z sieci, zmniejszenia prądu rozruchowego, zmniejszenia zawartości harmoniczných prądu pobieranego z sieci, jak również wpływa na symetryzację prądów fazowych przy niesymetrycznym obciążeniu [*Filtr aktywny FA3-10k*].

**Tabela 1.** Dane znamionowe filtra aktywnego FA3-10k [Filtr aktywny FA3-10k]

**Table 1.** The rated data of the active filter FA3-10k [Active filter FA3-10k]

Napięcia znamionowe	3 x 400 V
Zakres zmian napięcia wejściowego	+10 ÷ -15%
Zakres zmian częstotliwości sieci	50 Hz, ±5%
Moc znamionowa	10 kVA
Prąd znamionowy wyjściowy	14 A
Szczytowy prąd wyjściowy	36 A
Zawartość harmonicznych w prądzie wyjściowym	< 5%
Moc strat	36 W

### 3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch kart akwizycji danych PXIe-6124 i rejestratora – komputera przemysłowego firmy National Instruments z kontrolerem NI PXIe-8106. Do pomiarów wykorzystano częstotliwość próbkowania równą 30 kHz z równoległą rejestracją we wszystkich kanałach pomiarowych. W torach napięciowych wykorzystano układ kondycjonowania sygnału z przetwornikami firmy LEM CV3-150 oraz filtry antyaliasingowe LTC 1564 o częstotliwości odcięcia 10 kHz. Do pomiaru przebiegów chwilowych prądów wykorzystano sondy prądowe tzw. cewki Rogowskiego z serii PEM LFR1/15.

W toku badań rejestrowano trzy napięcia międzyfazowe i trzy prądy rozważanego odbiornika. Analizę wyników pomiarowych przeprowadzono w środowiskach Mathcad i Labview.

Wymaganą w analizie szerokość okna pomiarowego 10 okresów (dla częstotliwości nominalnej sieci 50 Hz będzie to 200 ms) wyznaczono na podstawie przejść przez zero składowej podstawowej sygnału, po wyeliminowaniu składowych wyższej częstotliwości za pomocą cyfrowej filtracji dolnoprzepustowej [IEC Standard 61000-4-30, IEC Standard 61000-4-7]. Wartości poszczególnych prążków harmonicznych w szeregu Fouriera obliczono za pomocą dyskretnej transformacji Fouriera (DFT).

Do wyznaczenia parametrów THDU i THDi (*Total Harmonic Distortion*), odpowiednio dla napięć i prądów, przyjęto zależność (1) [IEC Standard 61000-4-7]:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left( \frac{G_{sg,h}}{G_{sg,1}} \right)^2} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

gdzie:

- $G_{sg,h}$  – wartość skuteczna podgrupy harmoniczej  $h$ -tego rzędu,
- $G_{sg,1}$  – wartość skuteczna podgrupy składowej podstawowej.

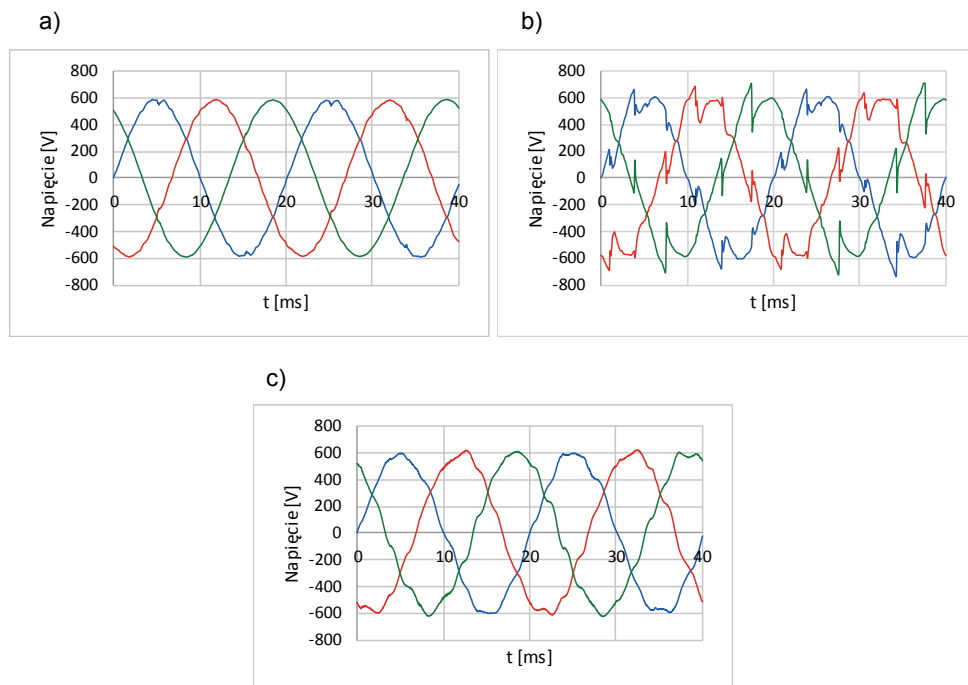
Ze względu na podatność modelu laboratoryjnego sieci na niewielkie nawet zaburzenia, charakterystyczną również dla mikrosieci okrętowych, dla porównania i jako uzupełnienie analiz dla napięć i prądów wyznaczono parametry, odpowiednio TWDU oraz TWDi (*Total Waveform Distortion*), opisane zależnością (2) [IEC Standard 61000-4-7]:

$$TWD = \frac{\sqrt{U_{RMS}^2 - G_{sg,1}^2}}{G_{sg,1}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

gdzie:

- $U_{RMS}$  – wartość skuteczna sygnału,
- $G_{sg,1}$  – wartość skuteczna podgrupy składowej podstawowej.

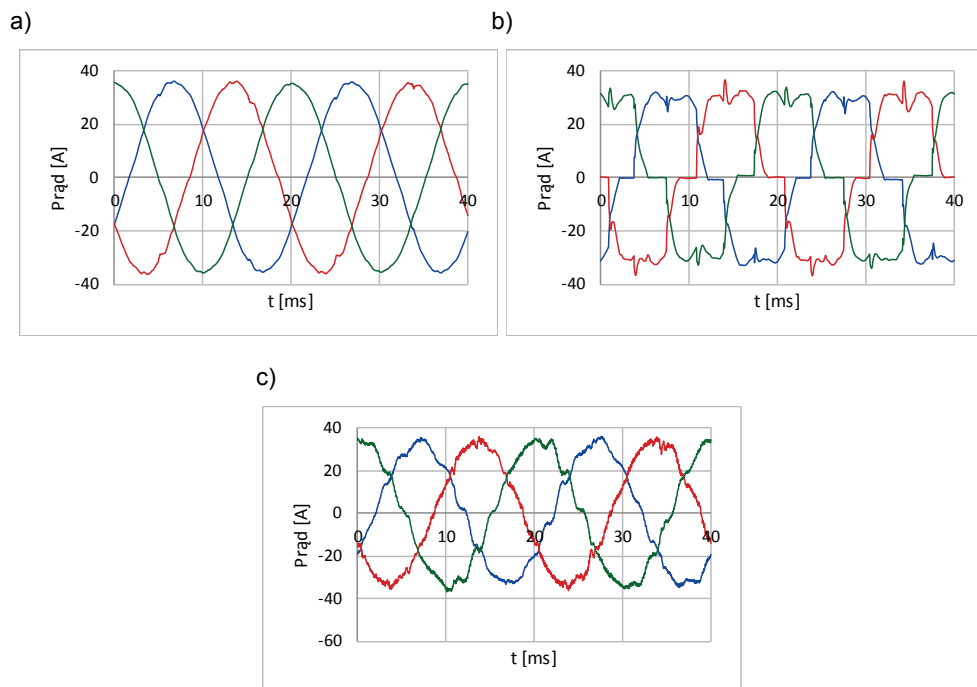
Na rysunku 2 pokazano przebiegi chwilowe trzech napięć międzyfazowych ( $u_{12}$ ,  $u_{23}$ ,  $u_{31}$ ), zarejestrowane na szynach głównych rozdzielnicy zasilanej z jednej prądnicy: dla odbiornika liniowego, odbiornika nieliniowego bez filtra aktywnego i z filtrem aktywnym. Przy obciążeniu liniowym występują niewielkie zniekształcenia napięć (napięcia na szynach są praktycznie sinusoidalne, a ewentualne rozbieżności wynikają z wieloletniej eksploatacji rozważanego systemu elektroenergetycznego), współczynnik THDU jest równy 1,78%. Po włączeniu odbiornika nieliniowego napięcie ulega znacznemu odkształceniu, THDU jest równy 14,21%. Włączenie filtra aktywnego powoduje wygładzenie przebiegu napięcia i poprawę współczynnika THDU, który jest równy 4,51%.



**Rys. 2.** Przebiegi chwilowe napięć na szynach przy zasilaniu rozdzielnic z jednej prądnicy dla różnych konfiguracji załączanych odbiorników  
a) odbiornik liniowy, b) odbiornik nieliniowy, c) odbiornik nieliniowy z filtrem aktywnym

**Fig. 2.** The voltage waveforms registered on the bus bars of the main switchboard for various loads configurations during one generator online.  
a) linear load, b) nonlinear load, c) nonlinear load with the active filter

Na rysunku 3 zestawiono przebiegi chwilowe trzech prądów ( $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ), odbiornika, zasilanego z jednej prądnicy: dla odbiornika liniowego, odbiornika nieliniowego bez filtra aktywnego i z filtrem aktywnym. Podczas pracy jednej prądnicy odbiornik nieliniowy wprowadzał zniekształcenia prądu i napięcia o wartości THD, równej odpowiednio 19,04% i 14,21%. Po załączeniu filtra wymienione parametry spadły odpowiednio do wartości 5,85% i 4,51%, a zatem o 13,19 i 9,7 punktów procentowych.



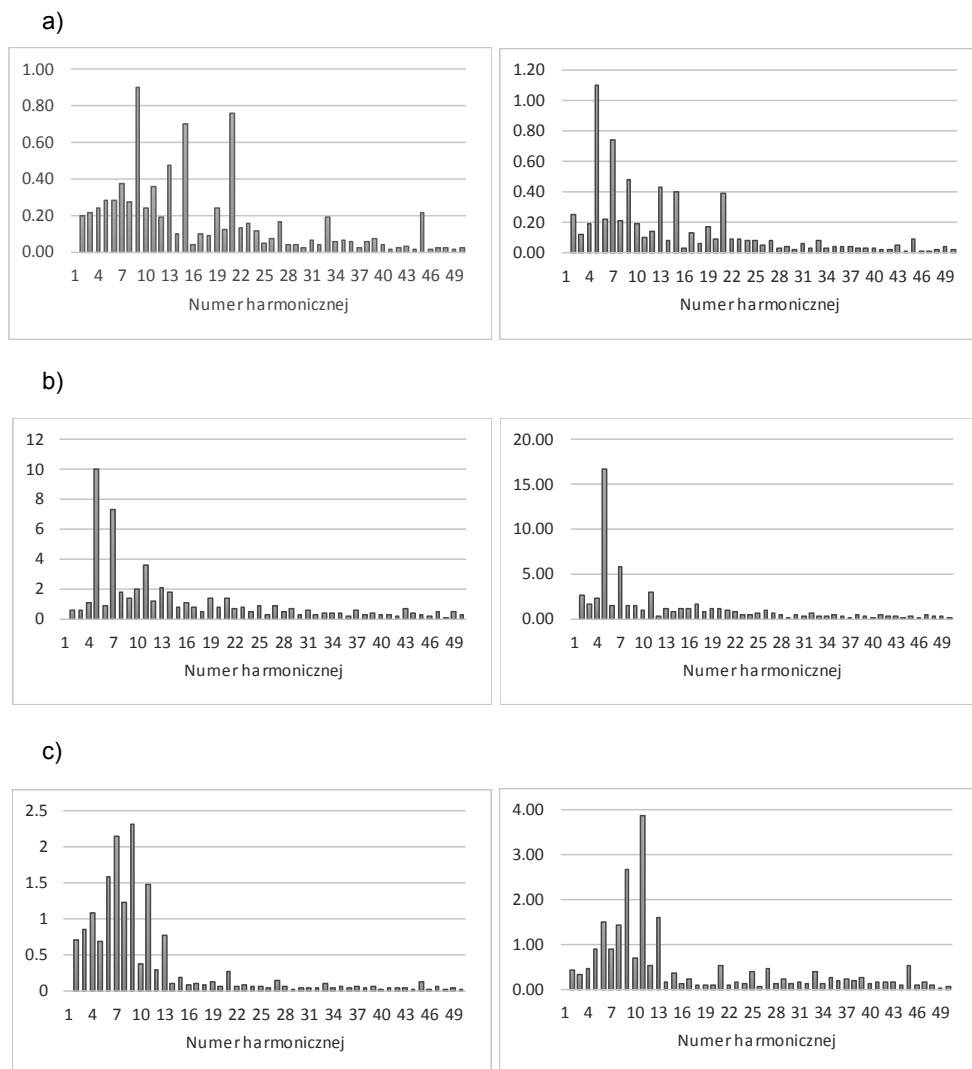
**Rys. 3.** Przebiegi chwilowe prądu odbiornika przy zasilaniu rozdzielnicy z jednej prądnicy dla różnych konfiguracji załączanych odbiorników  
 a) odbiornik liniowy, b) odbiornik nieliniowy, c) odbiornik nieliniowy z filtrem aktywnym

**Fig. 3.** The load current waveforms for various loads configurations during one generator online  
 a) linear load, b) nonlinear load, c) nonlinear load with the active filter

Jako uzupełnienie analizy wyznaczono widma napięcia ( $u_{12}$ ) i prądu ( $i_1$ ) do 50. harmonicznej (rys. 4 – dla lepszej czytelności w widmach pominięto prezentację składowej podstawowej). Przed korekcją zniekształceń, pochodzących od odbiornika nieliniowego, w prądzie i napięciu dominowały 5. i 7. harmoniczne z wartościami odpowiednio: 16,68% i 5,80% dla prądu oraz 10,02% i 7,26% dla napięcia. Pozostałe składowe harmoniczne przyjmowały wartości poniżej 3,1% w prądzie i 3,6% w napięciu. Po załączeniu filtru na sieć w prądzie dominowały harmoniczne 9. i 11. z wartościami odpowiednio 2,68% i 3,88%, a w napięciu harmoniczne 7. i 9. z wartościami w granicach 2,3%. Pozostałe składowe harmoniczne w prądzie i w napięciu przyjmowały wartości w granicach 1,6%.

Dla porównania, podczas pracy odbiornika liniowego w paśmie do 50. harmonicznej składowe harmoniczne prądu nie przekraczały wartości 1,2%, a harmoniczne napięcia 1%.



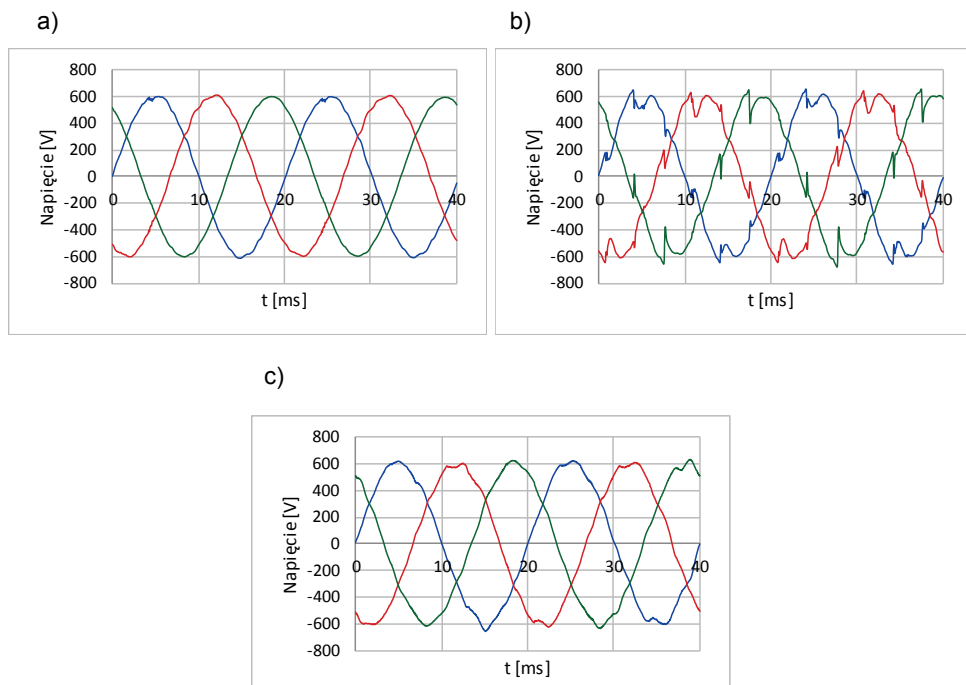


**Rys. 4.** Procentowe widma napięcia (lewa kolumna) i prądu przy zasilaniu rozdzielnic z jednej prądnicy

a) odbiornik liniowy, b) odbiornik nieliniowy, c) odbiornik nieliniowy z filtrem aktywnym

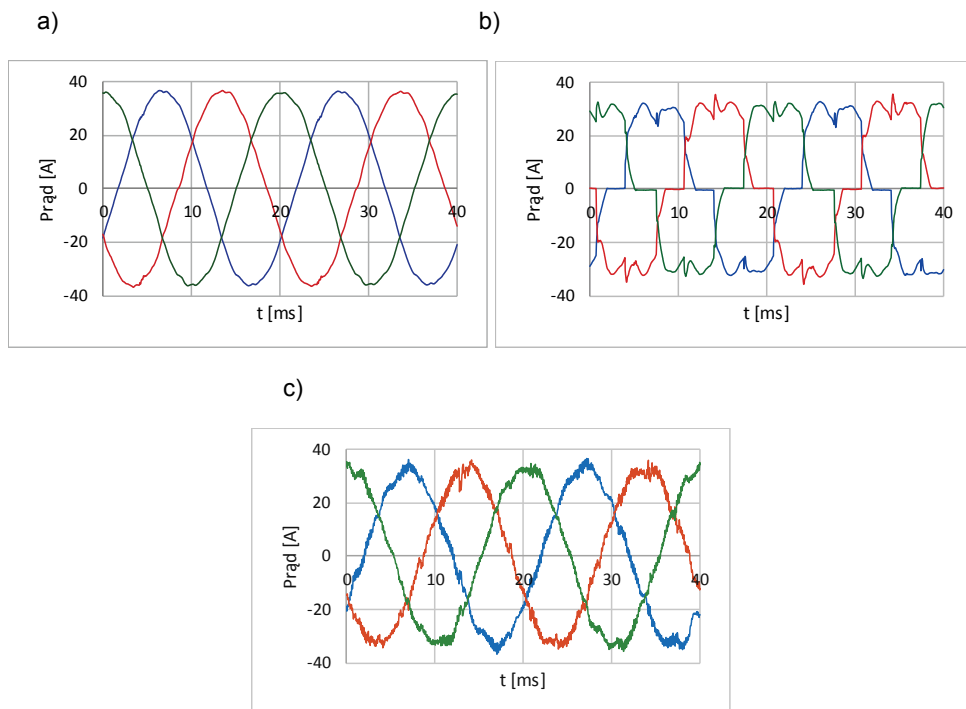
**Fig. 4.** The voltage (the left column) and current percentage spectra for one generator online  
 a) linear load, b) nonlinear load, c) nonlinear load with the active filter

Analogicznie do wyżej opisanej konfiguracji na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przebiegi chwilowe napięć na szynach i prądów odbiornika przy zasilaniu rozdzielnic z dwóch prądnic. W czasie pracy równoległej dwóch prądnic odbiornik nieliniowy wprowadzał zniekształcenia prądu i napięcia o wartości THD, równej odpowiednio 21,59% i 10,32%. Po załączeniu filtra wymienione parametry spadły odpowiednio do wartości 4,92% i 3,22%, a zatem o 16,67 i 7,1 punktów procentowych.



**Rys. 5.** Przebiegi chwilowe napięć na szynach przy zasilaniu rozdzielnic z dwóch prądnic dla różnych konfiguracji załączanych odbiorników  
a) odbiornik liniowy, b) odbiornik nieliniowy, c) odbiornik nieliniowy z filtrem aktywnym

**Fig. 5.** The voltage waveforms registered on the bus bars of the main switchboard for various loads configurations during two generators online  
a) linear load, b) nonlinear load, c) nonlinear load with the active filter

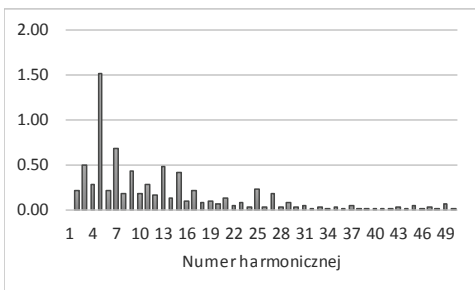
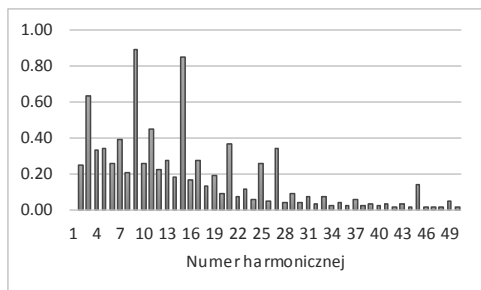


**Rys. 6.** Przebiegi chwilowe prądu odbiornika przy zasilaniu rozdzielnic z dwóch prądnic dla różnych konfiguracji załączanych odbiorników  
a) odbiornik liniowy, b) odbiornik nieliniowy, c) odbiornik nieliniowy z filtrem aktywnym

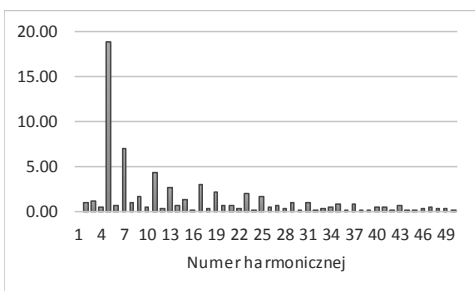
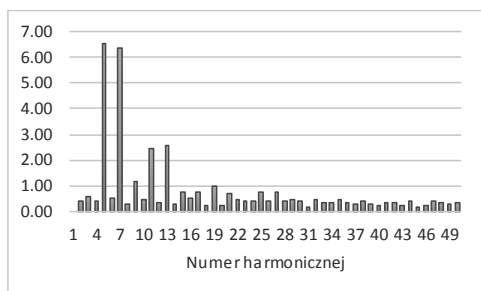
**Fig. 6.** The load current waveforms for various loads configurations during two generators online  
a) linear load, b) nonlinear load, c) nonlinear load with the active filter

Przed korekcją zniekształceń w prądzie i napięciu dominowały harmoniczne 5. i 7. z wartościami 18,82% i 6,97% w prądzie oraz z wartościami w granicach 6–7% w napięciu (rys. 7). Pozostałe składowe harmoniczne przyjmowały wartości poniżej 4,5% dla prądu i poniżej 3% dla napięcia. Należy dodać, że szczególnie w prądzie dobrze są widoczne harmoniczne charakterystyczne dla pracy przekształtnika sześciopulsowego (tj. 5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., 25....). Po załączeniu filtra na sieć dominowały harmoniczne: w prądzie 11., a w napięciu 7. z wartościami odpowiednio 2,85% i 2%. W obu przebiegach pozostałe harmoniczne miały średnie wartości nie większe niż 1,7% dla prądu i 1,1% dla napięcia. Dla porównania, podczas pracy odbiornika liniowego w paśmie do 50. harmonicznej zawartość harmonicznych prądu nie przekraczała wartości 1,5%, a harmonicznych napięcia 1%.

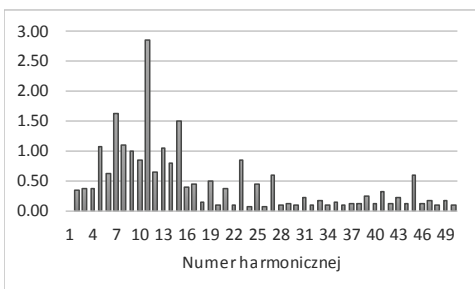
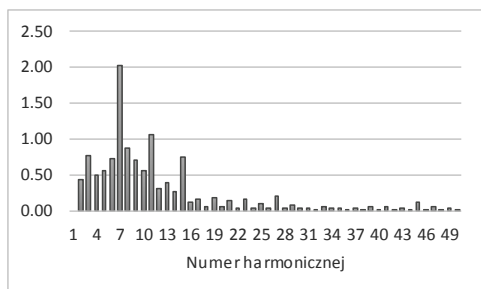
a)



b)



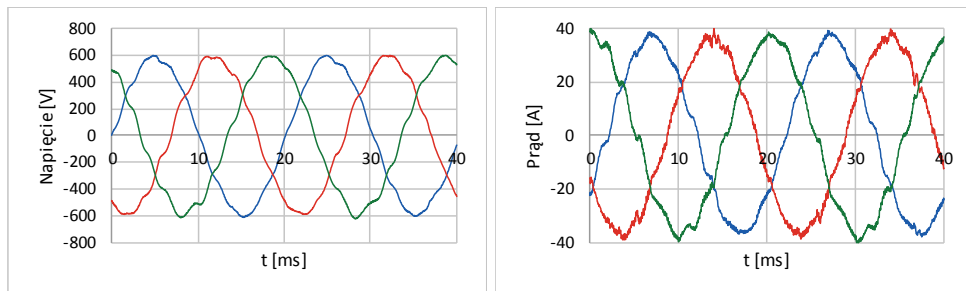
c)



**Rys. 7.** Procentowe widma napięcia (lewa kolumna) i prądu przy zasilaniu rozdzielnic z dwóch prądnic  
a) odbiornik liniowy, b) odbiornik nieliniowy, c) odbiornik nieliniowy z filtrem aktywnym

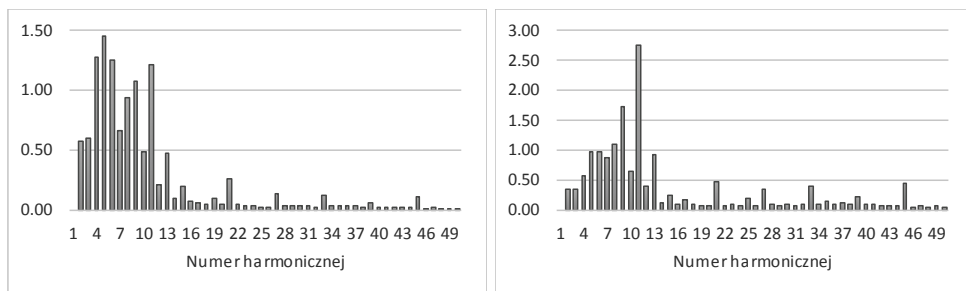
**Fig. 7.** The voltage (the left column) and current percentage spectra for two generators online  
a) linear load, b) nonlinear load, c) nonlinear load with the active filter

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wyniki rejestracji dla liniowego odbiornika zasilanego z jednej prądnicy z obecnym na szynach rozważanym filtrem aktywnym.



**Rys. 8.** Przebiegi chwilowe napięć na szynach i prądów odbiornika przy zasilaniu rozdzielnicą z jednej prądnicy oraz z załączonym filtrem aktywnym

**Fig. 8.** The busbars voltages and load currents waveforms for one generator online, linear load and the active filter



**Rys. 9.** Procentowe widma napięcia (po lewej stronie) i prądu przy zasilaniu odbiornika liniowego z jednej prądnicy oraz z załączonym filtrem aktywnym

**Fig. 9.** The voltage (the left one) and current percentage spectra for one generator online, linear load and the active filter

Po załączeniu filtru na sieć bez obecności odbiornika nieliniowego w sieci wartości składowych harmoniczných w prądzie i napięciu wzrosły do maksymalnych wartości: dla prądu 2,76% (11. harmoniczna) i dla napięcia 1,46% (5. harmoniczna). Filtr załączony na sieć podczas niepracującego odbiornika nieliniowego pogarsza wskaźniki THD napięcia i prądu: przed załączeniem filtru THDu wynosiło 1,78%, a THDi – 1,70%, po załączeniu filtru THDu wynosi 3,29%, a THDi – 4,20%.

W celu podsumowania analiz w tabeli 2 zestawiono wartości współczynników THD i TWD, charakteryzujących zniekształcenia napięć i prądów dla wszystkich badanych konfiguracji rozdzielnic okrętowej. Dla dwóch prądnic pracujących równolegle na szynę, zgodnie z oczekiwaniami autorów [Tarasiuk i in. 2014], wartości THDu i TWDu są niższe zarówno w konfiguracji odbiornik nieliniowy, jak i odbiornik nieliniowy z filtrem. Należy też zwrócić uwagę, że w przypadku

współpracy dwóch prądnic z odbiornikiem nieliniowym i filtrem różnica między wskaźnikami THDi i TWDi jest relatywnie większa (ponad 2%) niż dla jednej prądnicy i takiej samej konfiguracji odbiornika.

**Tabela 2.** Porównanie współczynników zniekształceń napięć i prądów dla różnej konfiguracji rozdzielnic okrętowej

*Table 2. The comparison of the voltages and currents distortions coefficients for various configurations of the main switchboard under test*

Konfiguracja		THDu [%]	TWDu [%]	THDi [%]	TWDi [%]
<b>1 prądnica załączona na szyny główne</b>	Odbiornik liniowy	1,78	2,10	1,70	1,92
	Odbiornik nieliniowy	14,21	15,18	19,04	19,66
	Odbiornik nieliniowy z filtrem aktywnym	4,51	5,04	5,85	6,58
<b>2 prądnice załączone na szyny główne</b>	Odbiornik liniowy	1,92	2,27	2,08	2,33
	Odbiornik nieliniowy	10,32	10,62	21,59	21,75
	Odbiornik nieliniowy z filtrem aktywnym	3,22	3,78	4,92	7,09
<b>1 prądnica załączona na szyny główne</b>	Odbiornik liniowy z filtrem aktywnym	3,29	4,04	4,20	5,02

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, przeprowadzone w Laboratorium Elektroenergetyki Okrętowej dla okrętowej rozdzielnic RG 103A i filtra aktywnego FA3-10k. Analiza powyższych wyników pomiarowych uzasadnia potrzebę stosowania filtrów aktywnych w okrętowych systemach elektroenergetycznych. Badania potwierdzają również możliwość wykorzystania wyżej wymienionego filtra do współpracy z okrętowymi sieciami elektroenergetycznymi. Negatywne skutki występowania wyższych harmonicznych w napięciu i prądzie odbiorników nieliniowych stanowią bardzo duży problem.

Zastosowanie filtra aktywnego w znacznym stopniu poprawia parametry jakości energii elektrycznej w okrętowym systemie elektroenergetycznym, co zauważalne jest przy porównaniu przebiegów chwilowych odpowiednich prądów i napięć oraz współczynników opisujących ich zniekształcenia. Zarazem należy zwrócić uwagę na fakt, iż współpraca filtra aktywnego z systemem elektroenergetycznym, w którym nie występuje odbiornik nieliniowy, skutkuje pogorszeniem parametrów jakości elektrycznej, a nie, jakby się mogło wydawać, ich poprawą. Warto również zwrócić uwagę na znaczną różnicę pomiędzy wartościami wskaźników THD i TWD, co sugeruje wzrost zawartości interharmonicznych, powodowany pracą filtra aktywnego. Dlatego należy bezwzględnie dbać o wyłączenie filtra aktywnego wtedy, gdy obciążenie nieliniowe nie pracuje na szynach.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono pełną zgodność zachowania się elektroenergetycznej sieci laboratoryjnej z rzeczywistą siecią okrętową (porównując ze statkiem mv „Horyzont II”) dla zmiany liczby prądnic, przy pracy odbiornika nieliniowego. Zapewnia to odpowiednią jakość dydaktyki i sugeruje podobne zachowanie sieci okrętowej z filtrem aktywnym jak sieci laboratoryjnej.

## LITERATURA

- Bałkowski, B., 2016, *Nowoczesna kompensacja mocy biernej i wyższych harmonicznych z wykorzystaniem kompensatorów dynamicznych STATCOM i EFA*, Acta Energetica, 1.04.2016.
- Czornik, J., Łukiewski, M., 2015, *Filtry harmonicznych gwarancją kompatybilności elektromagnetycznej oraz wysokiej sprawności przekształtnikowych układów napędowych*, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, nr 2(106).
- Filtr aktywny FA3-10k*, dokumentacja techniczno-ruchowa.
- Hanzelka, Z., 2014, *Jakość energii elektrycznej, cz. 4, Wyższe harmoniczne napięć i prądów*, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Kraków.
- IEC Standard 61000-4-7, 2002, *General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Measuring Instruments for Powersupply Networks and Attached Devices Used for the Measurements*.
- IEC Standard 61000-4-30, 2003, *Testing and Measurement Techniques – Power Quality Measurement Methods*.
- Tarasiuk, T., 2009, *Ocena jakości energii elektrycznej w okrętowych systemach elektroenergetycznych z wykorzystaniem procesów sygnałowych*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia.
- Tarasiuk, T., Guerrero, J., Shanta, G., 2016, *Marine Micro Grids, Control, Optimization, Power Quality and the Role of Power Electronics*, European Conference on Power Electronics and Applications 2016.
- Tarasiuk, T., Pilat, A., Górniak, M., Szweda, M., Troka, Z., 2014, *Experimental Study on Impact of Ship Electric Power Plant Configuration and Load Variation on Power Quality in the Ship Power Systems*, IANG Transactions on Engineering Science, Special Issue for the International Association of Engineers Conferences 2014.