OCENA JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA POLSKICH KUTRACH RYBACKICH

Dariusz TARNAPOWICZ
Akademia Morska w Szczecinie

Streszczenie: Jakość zasilania jest ważnym problemem dla systemów elektrycznych. Odbiorniki energii elektrycznej powinny pracować w warunkach znamionowych. Każde odchylenie od wartości znamionowych może powodować nieprawidłową pracę urządzeń elektrycznych, zmniejszenie ich trwałości, a w konsekwencji trwałe uszkodzenie. Znaczenie jakości energii elektrycznej dla systemów technicznych i pojedynczych urządzeń elektrycznych na kutrach rybackich jest fundamentalne. Eksplantacja urządzeń zasilanych energią elektryczną o obniżonej jakości skutkuje stratami ekonomicznymi i zagrożeniem bezpieczeństwa załogi. Badaniom jakości energii elektrycznej poddana została większość typów polskich kutrów rybackich. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań jakości energii elektrycznej przeprowadzone na reprezentatywnym typie kutrów rybackich. Dokonano krótkiej oceny wyników badań i zaproponowano rozwiązania poprawiające parametry jakości energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, system elektroenergetyczny kutrów rybackich, parametry jakości energii elektrycznej, filtr pasywny

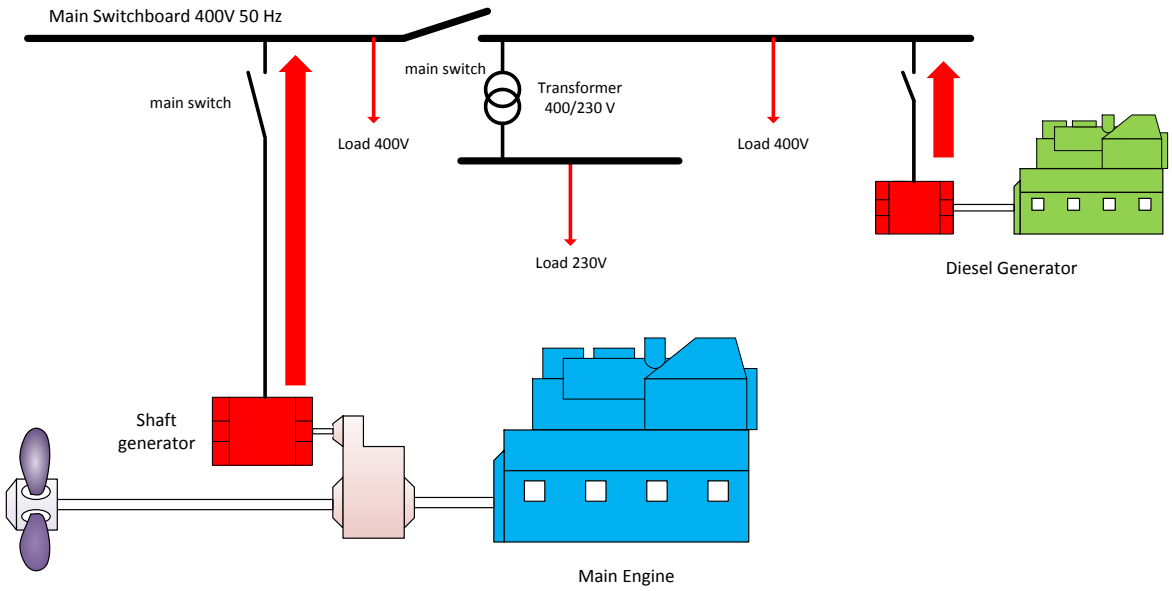
WSTĘP

W porównaniu do sieci elektrycznej niskiego napięcia występujących powszechnie na lądzie (typu TN) sieć okrętowa, w tym również elektryczna sieć na kutrach rybackich jest specyficzna. W celu zapewnienia ciągłości zasilania ważnych odbiorów na kutrach rybackich jest stosowana sieć z izolowanym punktem zerowym (typu IT). Sieć ta jest siecią „miękką", ponieważ moce autonomicznych źródeł prądu są porównywalne z mocą największych odbiorów energii elektrycznej. Zmiany obciążenia w tej sieci (włączanie i wyłączanie odbiorów dużej mocy) skutkują zmianami parametrów napięcia. Wraz z rozwojem technologii rośnie ilość i moc odbiorników instalowanych na kutrach. Występuje duże nasycenie odbiorników na małej przestrzeni. Modernizacja kutrów polegała miedzy innymi na instalacji nowych energochłonnych systemów. Przykładem może być system chłodzenia wodą morską RSW (Refrigerated Sea Water) lub chłodzenia wodą morską z lodem CSW (Chilled Sea Water) niezbędny na nowoczesnych kutrach rybackich.

Głównymi źródłami energii elektrycznej w energetycznych systemach na kutrach rybackich jest autonomiczny zespół prądotwórczy (DG – diesel generator), oraz prądnica wałowa (SG shaft generator). Powszechnie stosowanym generatorem jest prądnica synchroniczna.

Przykładowy schemat ideowy systemu elektroenergetycznego na kutrach rybackich z zastosowaniem DG i SG przedstawiono na rysunku 1. Zespół prądotwórczy DG oraz prądnica wałowa SG zasilają wydzielone odbiory. SG zasila najczęściej odbiory większej mocy (przykładowo system chłodzenia RSW). Nieprzewidziana jest praca równoległa dwóch źródeł

prądotwórczych. Na wszystkich jednostkach przewidziana jest możliwość podłączenia sieci elektrycznej kutra do sieci lądowej.



Rys. 1. Schemat ideowy typowego systemu elektroenergetycznego na kutrach rybackich

Wysoka jakość energii elektrycznej wytwarzanej, przesyłanej i użytkowej w systemach okrętowych ma decydujący wpływ na bezpieczeństwo i ekonomikę eksploatacji kutrów.

JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA KUTRACH RYBACKICH I JEJ WPŁYW NA ODBIORY

Energia elektryczna pod wpływem zaburzeń elektromagnetycznych ulega degradacji. Niekontrolowane zaburzenia energii elektrycznej występujące na kutrach rybackich mogą powodować zakłócenia, awarię, przyczyniając się do strat ekonomicznych. Najczęstszym problemem jest występowanie zmiany wartości napięcia, częstotliwości oraz asymetrii napięć [1].

Parametry napięcia (przede wszystkim poziom napięcia i częstotliwość) zmieniają się za sprawą odbiorów energii elektrycznej, ale przede wszystkim przy zmianie stanu morza (szczególnie dotyczy to prądnicy wałowej).

Jakość energii elektrycznej można zdefiniować, jako zbiór parametrów opisujących właściwości procesu dostarczania energii elektrycznej, określających bezprzerwowość zasilania oraz chrakteryzujących napięcie [2]. Do opisania jakości energii elektrycznej służą parametry jakościowe.

Odpowiednia jakość energii elektrycznej na statkach morskich (w tym też kutrach rybackich) definiowana jest przez towarzystwa klasyfikacyjne i organizacje międzynarodowe. Wartości dopuszczalne parametrów jakości energii elektrycznej dla jednostek pływających określone są w dokumentach IEC (International Electrotechnical Commission) i przedstawione w tabeli 1 [3].

Chwilowe odchylenia napięć od napięć znamionowych ma szczególne znaczenie dla bezpieczeństwa pracy okrętowych systemów technicznych, natomiast długotrwałe odchylenia wiążą się przede wszystkim z kosztami ekonomicznymi [4].

Tabela 1.

Wartości dopuszczalne parametrów jakości energii elektrycznej dla jednostek pływających

parametr	wielkość
Długotrwałe odchylenie napięcia	+6 % -10 %
Krótkotrwałe odchylenie napięcia	+20 % -20 %
Asymetria napięcia	3 %
Długotrwałe odchylenie częstotliwości	+5 % -5 %
Krótkotrwałe odchylenie częstotliwości	+10 % -10 %
THD	5 %
Pojedyncza harmoniczna	3 %
Czas powrotu składowych przejściowych napięcia	1.5 s
Czas powrotu składowych przejściowych częstotliwości	5 s

Wpływ poszczególnych parametrów na różne odbiory energii elektrycznej jest istotny. Można wymienić najważniejsze:

- Silniki elektryczne – poprzez zmianę momentu obrotowego (zależność momentu obrotowego od napięcia jest szczególnie istotna podczas rozruchu silników asynchronicznych klatkowych, a podczas pracy silnika wpływa na sztywność charakterystyki mechanicznej silnika). Zużywanie się łożysk silnika, przegrzewanie się silników
- Transformatory – zmiany pola magnetycznego, pogorszenie się współczynnika mocy, przegrzewanie się transformatorów
- Styczniki i przekaźniki – zmiana siły pola magnetycznego powoduje nieprawidłową pracę.
- Źródła światła – migotanie światła, zmniejszenie sprawności i trwałości źródeł światła
- Przewody zasilające – zwiększenie start w przewodach, starzenie się izolacji przewodów
- Urządzenia elektroniczne – zakłócenia w pracy urządzeń

BADANIA PARAMETRÓW JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA REPREZENTATYWNYM MORSKIM KUTRZE RYBACKIM

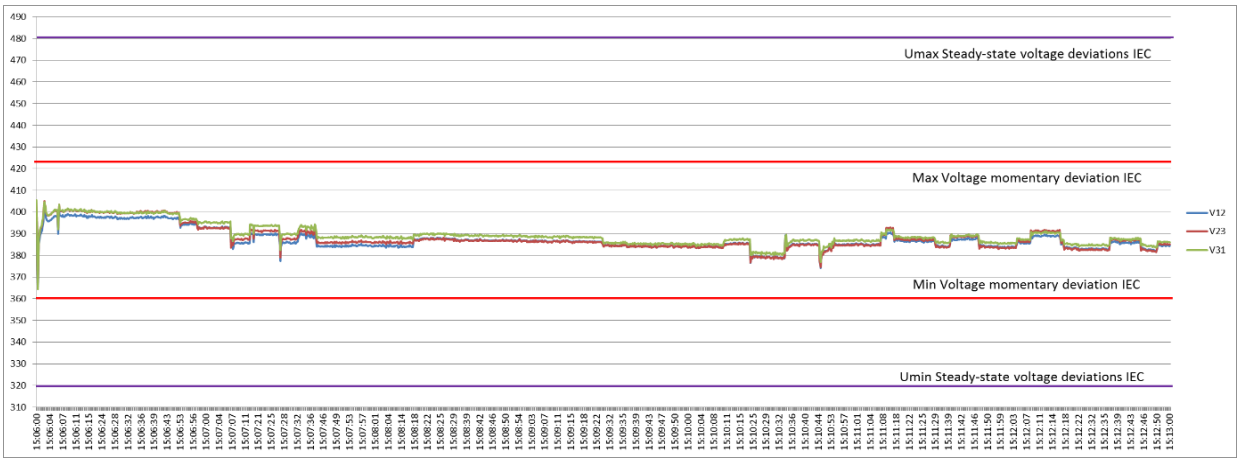
W ramach Programu Operacyjnego „Zrównoważony rozwój sektora rybołówstwa i nadbrzeżnych obszarów rybackich 2007-2013” wykonano pomiary jakości energii elektrycznej na większości typach polskich kutrów rybackich. W artykule przedstawiono analizę dla jednego typu kutra.

Przeprowadzone pomiary i rejestrację parametrów sieci elektrycznej. Pomiarów dokonano przy użyciu analizatora jakości energii z Certyfikatem Klasy (Class A) WALLY A3 zgodnego z IEC 61000-4-30 [5]. Badania były przeprowadzone w różnych stanach pracy kutra, tzn.: postój w porcie, manewry, jazda morska, trałowanie. W artykule przedstawiono

wyniki pomiarów elektrycznej sieci okrętowej dla jazdy morskiej i trałowania, gdzie obciążenie zespołów prądotwórczych były największe i zmieniające się. Pomiarów dokonano na szynach rozdzielnicy głównej.

DŁUGOTRWAŁE I KRÓTKOTRWAŁE ODCHYLENIE NAPIĘCIA

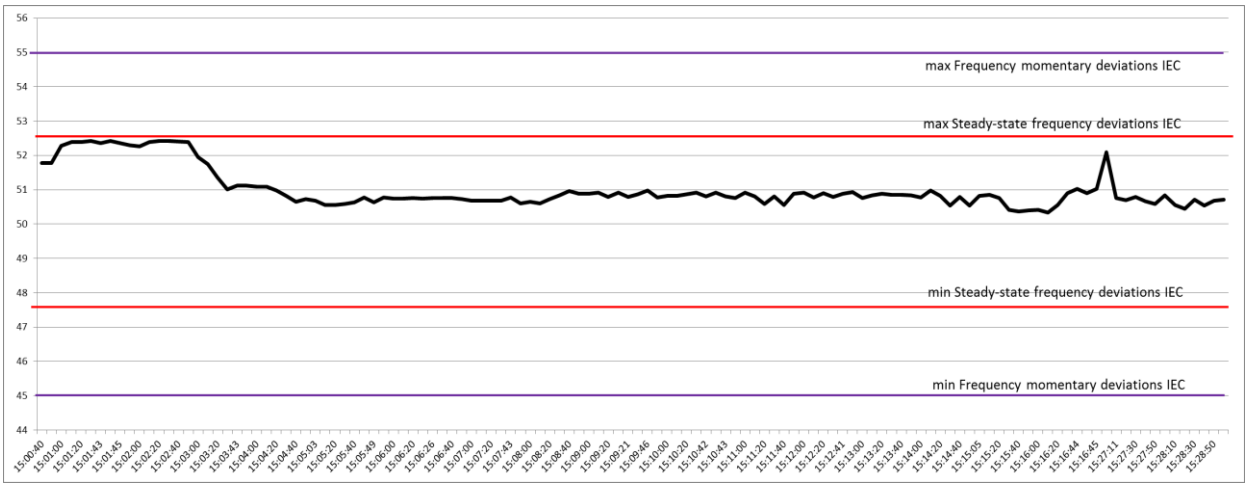
Rysunek 2 przedstawia przebiegi napięć międzyfazowych rejestrowanych podczas jazdy morskiej i trałowania. Zaznaczone są wartości dopuszczalne napięć zgodne z przepisami IEC (tabela 1)



Rys. 2. Przebiegi napięć międzyfazowych. Wartość nominalna U_N = 400 V

Długotrwałe i krótkotrwałe odchylenie częstotliwości

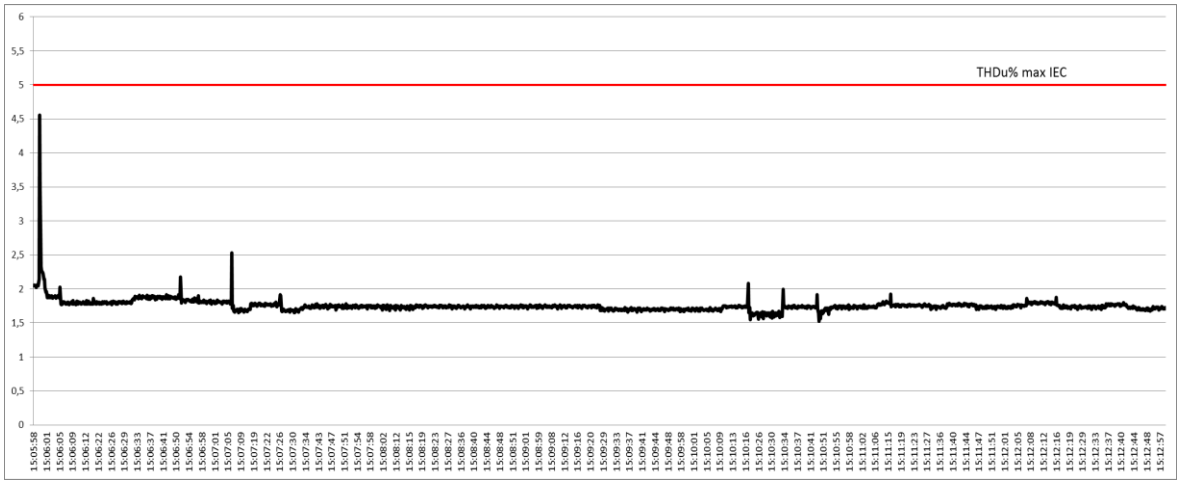
Rysunek 3 przedstawia częstotliwość napięcia rejestrowaną podczas jazdy morskiej i trałowania. Zaznaczone są wartości dopuszczalne częstotliwości zgodne z przepisami IEC (tabela 1)



Rys. 3. Częstotliwość napięcia. Wartość nominalna f_N = 50 Hz

Wskaźnik zawartości harmonicznych napięcia (THD_U)

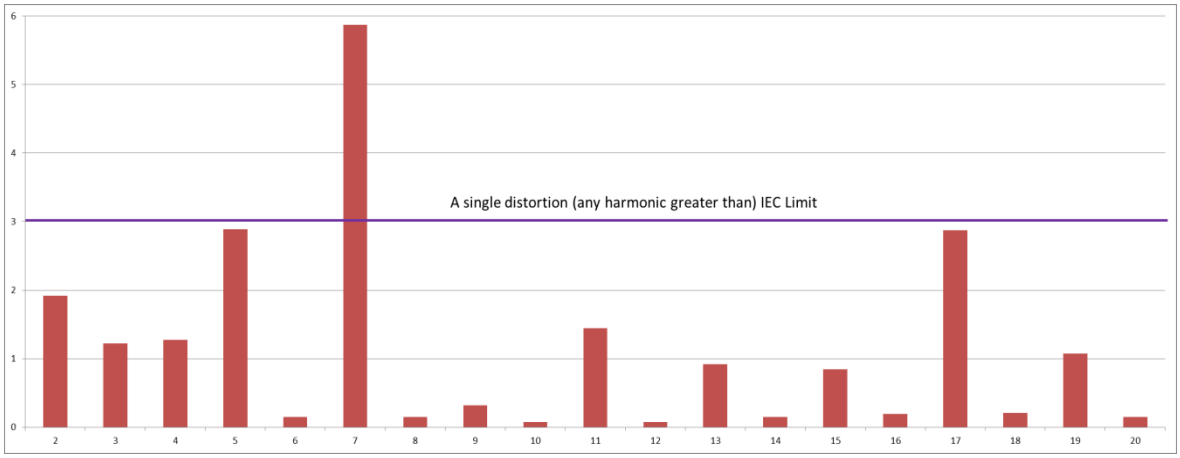
Rysunek 3 przedstawia zmianę THD_U rejestrowaną podczas jazdy morskiej i trałowania. Zaznaczona jest wartość dopuszczalna THD_U zgodne z przepisami IEC (tabela 1).



Rys. 4. THD$_U$% podczas zmian obciążenia

Wartości poszczególnych harmonicznych

Na rysunku 4 przedstawiono wartości poszczególnych harmonicznych napięcia w momencie największej wartości THD$_U$. Zaznaczona jest wartość dopuszczalna poszczególnych harmonicznych zgodne z przepisami IEC (tabela 1).



Rys. 5. Poszczególne harmoniczne w napięciu zasilania

Asymetria napięć międzyfazowych

Wskaźnik asymetrii napięć obliczany jest w oparciu o metodę składowych symetrycznych [6]. Wyznaczany jest na podstawie wzoru (1) zgodnie z normą [IEC 61000-4-30]:

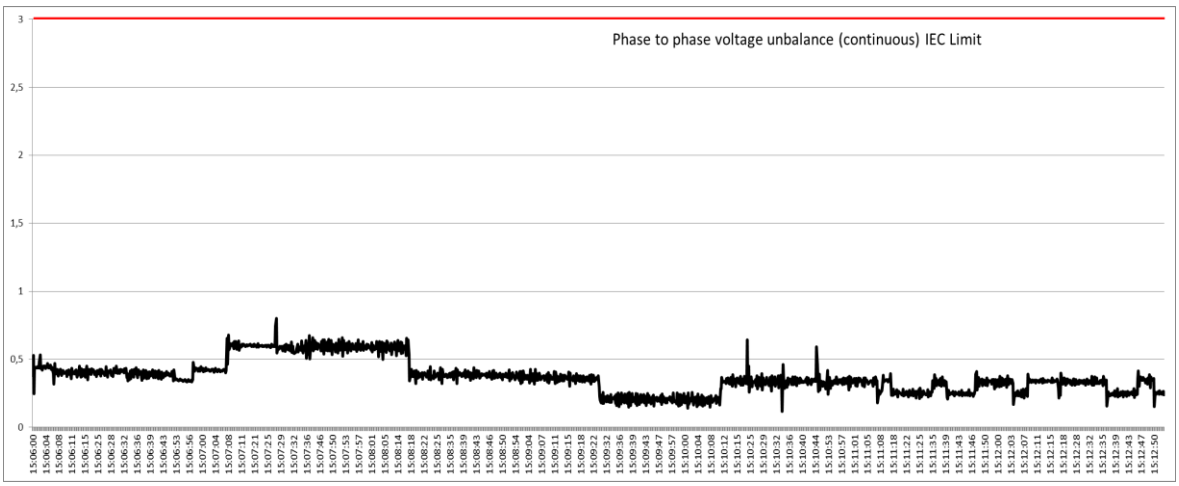
$$U_{ASYM}\% = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\cdot\beta}}{1+\sqrt{3-6\cdot\beta}}}\cdot 100\% \tag{1}$$

gdzie:

$$\beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2}$$

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}- wartości skuteczne pierwszych harmonicznych

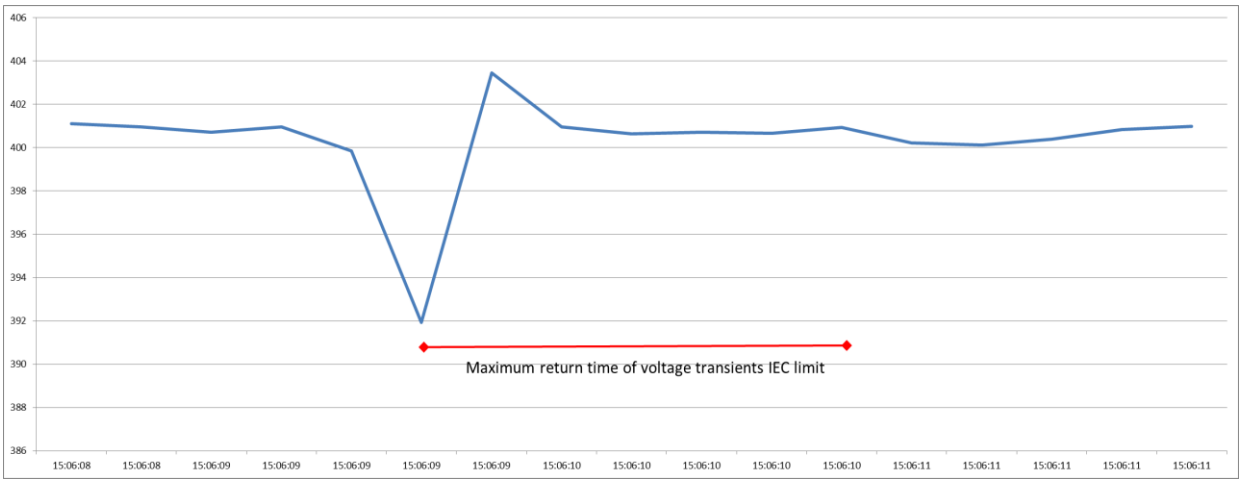
Na rys. 6 przedstawiony jest wskaźnik asymetrii napięcia obliczony w oparciu o wzór (1). Zaznaczona jest dopuszczalna wartość wskaźnika zgodnie z IEC (tabela 1).



Rys. 6. Wskaźnik asymetrii napięcia

Czas powrotu składowych przejściowych napięcia

Rysunek 7 przedstawia przebieg czasowy napięcia przy włączeniu dużego odbiornika i powrót składowej przejściowej napięcia do wartości nominalnej. Na rys. 7 przedstawiono wartość maksymalną czasu powrotu składowych przejściowych zgodnych z IEC (tabela 1).



Rys. 7. Powrót składowej przejściowej napięcia

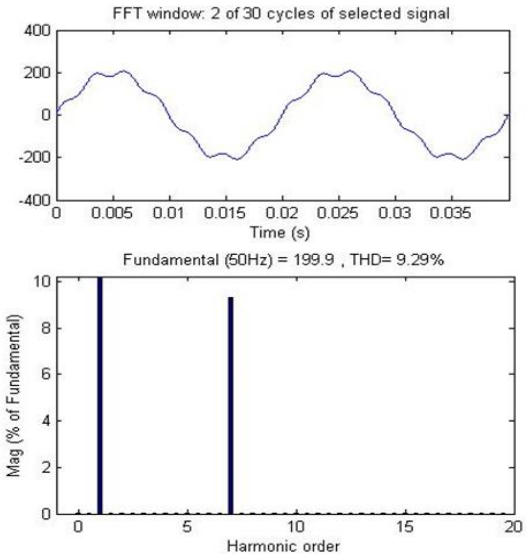
Analizując parametry jakości energii elektrycznej uzyskane w wyniku pomiarów (rys. 2 do rys. 7) można stwierdzić, że zdecydowana większość parametrów mieści się w granicach dop uszczalnych normą IEC. Odchylenia długotrwałe i krótkotrwałe nie przekraczają wartości dopuszczalnych. Asymetria napięć podczas zmian obciążenia nie przekracza wartości dopuszczalnych określonych normą. Czas powrotu składowych przejściowych napięcia praktycznie nie przekracza normy. Ogólne zniekształcenia THD_U% w napięciu mają wartości poniżej maksymalnej wartości normy IEC, jednakże harmoniczna 7 przekracza wartość dopuszczalną normą.

KOMPENSACJA WARTOŚCI POSZCZEGÓLNYCH HARMONICZNYCH

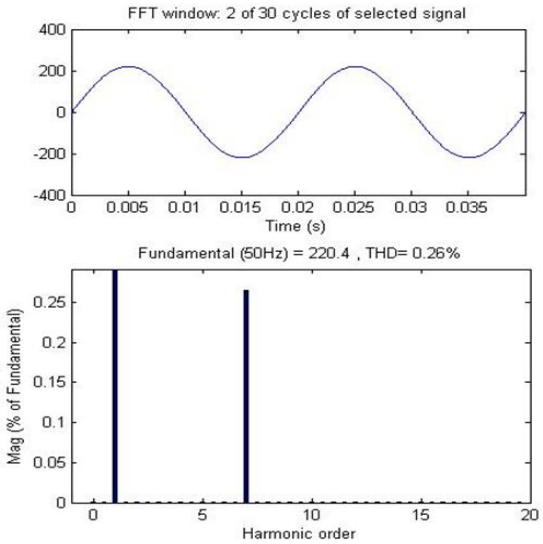
Jak wspomniano jedynym parametrem jakości energii elektrycznej otrzymanym w wyniku pomiarów przekraczającym dopuszczalną wartość była wartość 7 harmonicznej. Dopuszczalna wartość wg IEC wynosi 3% (tabela 1), a wartość 7 harmonicznej przekroczona została prawie dwukrotnie i wyniosła 5.87%.

W celu obniżenia wartości pojedynczej harmonicznej najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie filtra pasywnego. Filtry pasywne są to układy złożone z gałęzi szeregowo połączonych kondensatorów i dławików. Dołączone równolegle do szyn sieci zasilającej i dobrane do rezonansowej częstotliwości wybranej harmonicznej. Zastosowanie filtra pasywnego dla kompensacji większej ilości harmonicznych jest możliwe poprzez włączenie do sieci elektroenergetycznej kilku filtrów pasywnych w układzie kombinowanym. W tym wypadku celowe było by zastosowanie filtra aktywnego, który kompensuje spectrum harmonicznych.

W omawianym przypadku dobrano filtr pasywny w celu kompensacji 7 harmonicznej (dla 7 harmonicznej reaktancja wypadkowa filtra jest równa zero). Przeprowadzono badania symulacyjne z wykorzystaniem programu MATLAB-SIMULINK. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8a. Przebieg napięcia i widmo harmonicznych harmonicznych przy zastosowaniu filtra pasywnego



Rys. 8b. Przebieg napięcia i widmo bez zastosowania filtra

Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność zastosowania filtru pasywnego. Współczynnik zawartości harmonicznych w sieci zakłóconej 7 harmoniczną bez filtru pasywnego wynosi $THD_U\% = 9.29\%$ (rys. 8a). Po włączeniu filtra współczynnik zawartości harmonicznych spada do $THD_U\% = 0.26\%$ (rys. 8b). Na omawianym kutrze w celu poprawy $THD_U\%$ należałoby zastosować filtr kombinowany (dodatkowo włączyć dwa filtry pasywne na 5 i 17 harmoniczną).

W momencie włączania różnych odbiorów dużej mocy mogą wystąpić dynamiczne zmiany poszczególnych harmonicznych. W odpowiednich sekcjach rozdzielnicy głównej właściwe było by zastosowanie filtrów aktywnych.

WNIOSKI

Jakość energii elektrycznej nawet na tak małych jednostkach pływających, jakimi są morskie kutry rybackie, jest związana przede wszystkim z bezpieczeństwem pracy systemów i trwałością urządzeń. Powszechnie używane urządzenia kontrolne i sterujące, których nasycenie na nowoczesnych kutrach stale rośnie są zagrożone przy niskiej jakości energii elektrycznej.

Każda modernizacja systemów elektrycznych na kutrach powinna być potwierdzona pomiarami jakości energii elektrycznej. Przykładem może być jeden z kutrów, na którym zainstalowano przetwornice napięcia DC/AC dla przenośnych urządzeń pokładowych. Napięcie wyjściowe z przetwornicy było trapezoidalne (THD_U% ponad 40%) i żadne urządzenie pokładowe nie mogło pracować.

Oceniając wyniki pomiarów jakości energii elektrycznej na opisanym reprezentatywnym kutrze można stwierdzić, że większość parametrów jakości mieści się w granicach określonych przez przepisy IEC. Jedynym parametrem, który został przekroczony jest wartość pojedynczej harmonicznej napięcia. Proponowanym rozwiązaniem kompensacji pojedynczej harmonicznej jest zastosowanie filtru pasywnego.

LITERATURA

[1] Mindykowski J., Dlaczego problem jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych zasługuje na szczególną uwagę?, VII Szkoła-Konferencja, Elektrotechnika Prądy Niesinusoidalne, Przegląd Elektrotechniczny nr 6/2004.
[2] Hanzelka Z. Jakość Energii Elektrycznej. Elektroinstalator nr 9/2001.
[3] IEC 60092-101 Electrical installations in ships Part 101: Definitions and general requirements.
[4] Mindykowski J. Tarasiuk T. Jakość energii elektrycznej a ekonomiczna eksploatacja okrętowych systemów technicznych. Jakość energii elektrycznej Tom IV Zeszyt 2 Rok 1998.
[5] IEC 61000-4-30 ed3.0 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-30: Testing and measurement techniques, Power quality measurement methods.
[6] Urbański K. Pomiary i rejestracja asymetrii napięcia w obwodach trójfazowych. Pomiary, Automatyka, Kontrola 2006, nr 6, wyd. spec., s. 100-102.