

Andrzej Piłat

Akademia Morska w Gdyni

MODEL ELEKTROWNI OKRĘTOWEJ STATKU „HORYZONT II” W PROGRAMIE PSCAD

W artykule przedstawiono model okrętowej sieci elektroenergetycznej wykonanej w programie PSCAD X4. Obiektem, który zasymulowano, jest statek szkolno-badawczy „Horyzont II”. Zamodelowano prądnice synchroniczne wraz z regulatorami napięcia oraz napędzającymi je silnikami diesla. Przedstawiono przebiegi chwilowe napięć i prądów podczas załączenia i wyłączenia odbiornika o liniowej i nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej.

WSTĘP

Zmiany w elektrotechnice na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat, objawiające się wprowadzeniem szeregu nowych rozwiązań technicznych dotyczących procesów wytwarzania i użytkowania energii elektrycznej, spowodowały konieczność nowego spojrzenia na zagadnienie jakości energii elektrycznej w systemach elektroenergetycznych. Na uwagę zasługuje stale rosnąca liczba i moc odbiorników energii elektrycznej zainstalowanych w systemie, często o nieliniowych charakterystykach, co wywołuje coraz większe odchylenia parametrów charakteryzujących energetyczne sieci zasilające od parametrów znamionowych. Zmienia się nie tylko kształt czasowych przebiegów napięcia i prądu w rozważanych systemach, ale również pojawiają się znaczące różnice między rzeczywistymi i znamionowymi wartościami napięcia i częstotliwości. Ma to różnorodne negatywne skutki związane z poprawnym funkcjonowaniem odbiorników energii elektrycznej, powodujące m.in. dodatkowe straty energii. Problemy te dotyczą każdego systemu elektroenergetycznego, a w szczególności elektroenergetycznej sieci okrętowej. Statek jest miejscem o dużej koncentracji odbiorników, spełniających wielorakie funkcje, pracujących często w warunkach ekstremalnych narażeń klimatycznych i mechanicznych. Znaczna część tych obiektów, w tym niemal wszystkie związane ze sterowaniem i kontrolą systemów okrętowych, to urządzenia elektryczne i elektroniczne o nieliniowych charakterystykach.

W elektroenergetyce lądowej oraz okrętowej często zachodzi konieczność przebudowy lub zmiana konfiguracji systemu elektroenergetycznego. Wymiana, załączenie lub wyłączenie w dowolnej chwili urządzenia elektrycznego niosą za sobą niepewność poprawnej pracy części systemu elektroenergetycznego. Z tego

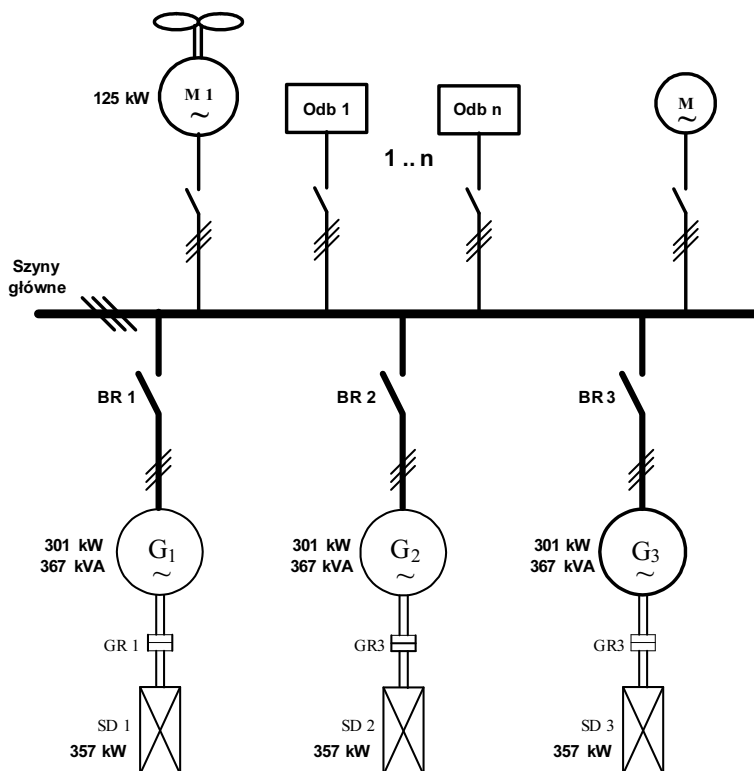
powodu przeprowadza się szereg symulacji pozwalających na wcześniejsze wykrycie i zapobieganie niepożądanym zjawiskom i skutkom wywołanym przez wyżej wspomniane czynności, mającym wpływ na życie i zdrowie załogi oraz bezpieczeństwo przewożonego ładunku.

Istnieje wiele programów pozwalających na przeprowadzenie symulacji zjawisk występujących w systemach elektroenergetycznych. Na szczególną uwagę zasługuje program PSCAD (ang. *Power Systems Computer Aided Design*), pochodzący z rodziny EMTDC (ang. *Elektromagnetic Transient including DC*) [7]. PSCAD służy do modelowania i symulacji różnego rodzaju systemów elektroenergetycznych takich jak: elektrownie wiatrowe, lądowe i okrętowe systemy elektroenergetyczne. Najczęściej jest on wykorzystywany do symulacji wybranych wielkości w systemach elektroenergetycznych w stanach przejściowych. PSCAD umożliwia także modelowanie układów pomiarowych, kontrolnych i sterujących [7]. W pracy [3] przedstawiono wykorzystanie programu PSCAD do symulacji elektroenergetycznego systemu okrętowego w różnych stanach eksploatacyjnych.

1. OKRĘTOWY SYSTEM ELEKTROENERGETYCZNY STATKU M/V „HORYZONT II”

„Horyzont II” jest statkiem szkolno-badawczym składającym się z trzech jednakowych zespołów prądowórczych. W skład zespołu prądowórczego wchodzi: prądnica synchroniczna o mocy znamionowej 301 kW (376 kVA), napędzana za pomocą czterosuwowego silnika diesla o mocy znamionowej 357 kW. W zależności od zapotrzebowania na moc pobieraną przez odbiorniki możliwa jest praca pojedynczego, dwóch lub trzech współpracujących ze sobą agregatów prądowórczych, załączonych na szyny głównej rozdzielnic. Wszystkie odbiorniki zainstalowane na statku zasilane są z rozdzielnic głównej (rys. 1). Wśród odbiorników większych mocy zainstalowanych na statku można wyróżnić: ster strumieniowy o mocy znamionowej 125 kW, silnik indukcyjny dźwigu pokładowego 55 kW oraz silnik indukcyjny do napędu sprężarki klimatyzacji 28 kW. Pozostałe odbiorniki mają mniejszą moc i nie wywierają większego wpływu na zmiany parametrów jakości energii elektrycznej sieci (napięcie, częstotliwość).

Elektroenergetyczna sieć okrętowa jest siecią miękką. Charakteryzuje się dużymi zmianami napięcia i częstotliwości, wynikającymi z porównywalnych mocy elektrowni okrętowej i załączanych dużych odbiorników energii. Bardzo ważnym zagadnieniem dla okrętowego systemu elektroenergetycznego jest ciągłość zasilania odbiorników podczas manewrów. Statek musi posiadać pełną manewrowość, a więc i pewność zasilania odbiorników, od których zależy bezpieczeństwo załogi i przewożonego ładunku. Napięcie znamionowe systemu elektroenergetycznego statku jest równe 400 V, zaś częstotliwość znamionowa wynosi 50 Hz.

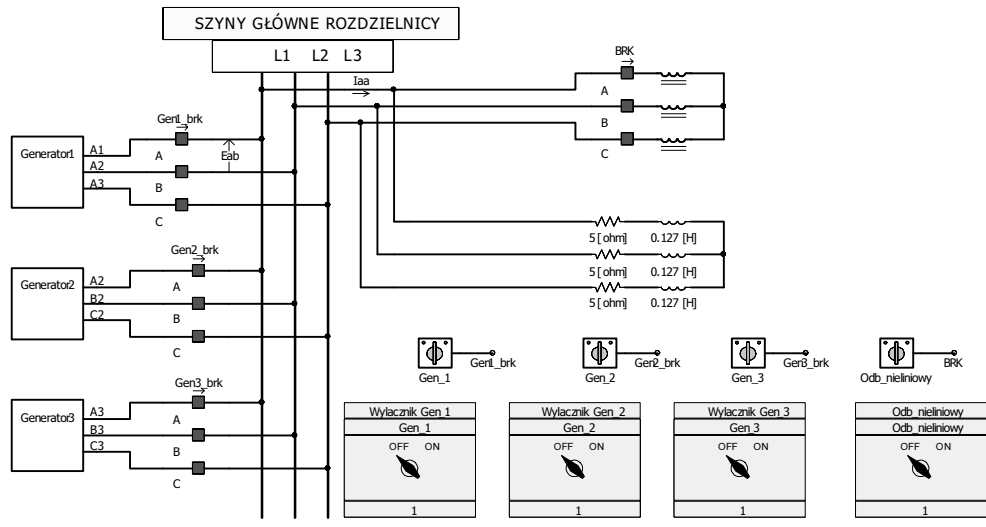


Rys. 1. System elektroenergetyczny statku m/v „Horyzont II” (G_1 – prądnica synchroniczna, SD1 – silnik diesla, GR – przekładnia, M1 – ster strumieniowy, BR – wyłącznik)

Fig. 1. Electric power system of the m/v „Horyzont II” (G_1 – synchronous generators, SD1 – diesel engine, GR – gear, M1 – motor of bow thruster, BR – breaker)

2. MODEL SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO STATKU „HORYZONT II” W PROGRAMIE PSCAD

Wstępny model okrętowej sieci elektroenergetycznej statku m/v „Horyzont II” wykonano w programie PSCAD wersji X4. W symulacji skoncentrowano się na zamodelowaniu trzech jednakowych zespołów prądowórczych pracujących na wspólne szyny. W skład pojedynczego agregatu wchodzi prądnica synchroniczna o mocy znamionowej 301 kW, 376 kVA oraz czterosuwowy silnik diesla o mocy znamionowej 357 kW. Na rysunku 2 przedstawiono model trzech jednakowych prądnic załączonych na szyny rozdzielnic głównej. Obciążenie stanowią dwa odbiorniki: jeden liniowy rezystancyjno-indukcyjny o parametrach $R = 5 \Omega$ i $L = 0,127 \text{ H}$, zaś drugi odbiornik nieliniowy dużej mocy (dławik).

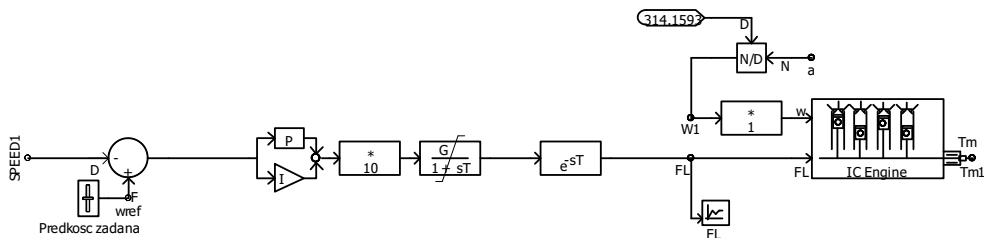


Rys. 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa odbiornika nieliniowego obciążającego prądnice symulowanego systemu elektroenergetycznego

Fig. 2. Current-voltage characteristics of non-linear loads simulated loading generators of the power system

W programie możliwy jest wybór odpowiedniej liczby załączonych agregatów prądotwórczych w zależności od liczby załączonych odbiorników w dowolnej chwili, poprzez ustawienie przełącznika Gen_1, Gen_2 lub Gen_3 w odpowiedniej pozycji. Możliwe jest również załączenie i wyłączenie w dowolnej chwili odbiornika nieliniowego, zaś odbiornik o liniowej charakterystyce jest dołączony na stałe.

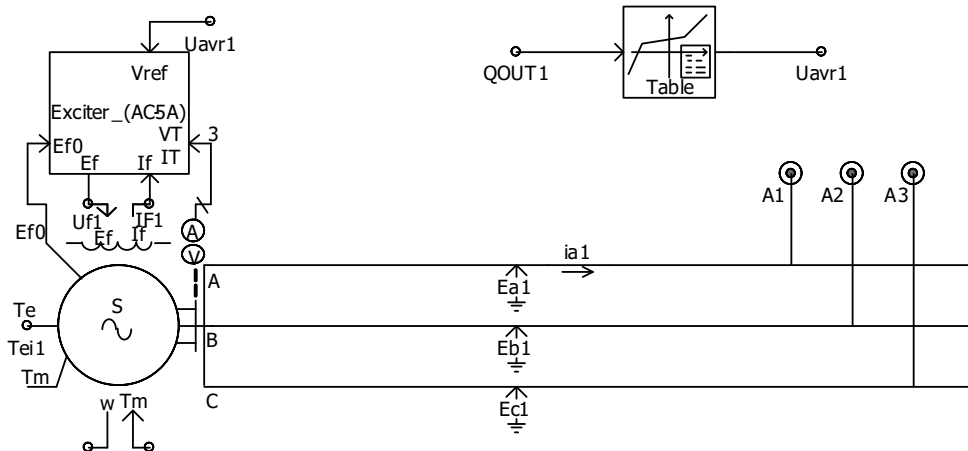
Na rysunku 3 przedstawiono model czterosuwowego silnika diesla wraz z regulatorem prędkości obrotowej [2]. Sygnałami wejściowymi do regulatora prędkości obrotowej są rzeczywista prędkość obrotowa pochodząca z wału prądnicy oraz zadana prędkość obrotowa. Sygnały te poprzez odpowiednie transmitancje przekształcane są na dawkę paliwa, która podawana jest na wejście FL (Fuel Intake) w modelu silnika diesla (IC Engine). Do utrzymania stałej prędkości obrotowej wykorzystano regulator proporcjonalno-całkujący PI. Sygnałem wyjściowym z silnika jest moment mechaniczny T_{m1} , przekazywany na wejście synchronicznej prądnicy prądu przemiennego.



Rys. 3. Model czterosuwowego silnika diesla wraz z regulatorem prędkości obrotowej [2]

Fig. 3. Model of a four-stroke diesel engine with the speed governor

Model prądnicy synchronicznej wraz z regulatorem napięcia przedstawiono na rysunku 4 [7]. Do prądnicy dołączono regulator napięcia (Exciter_(AC5A)), służący do utrzymania stałej wartości skutecznej napięcia na szynach głównych rozdzielnic. Poprzez blok *Table*, który połączony jest z regulatorem napięcia, realizowany jest rozptyw mocy biernej pomiędzy załączone jednocześnie na szyny główne prądnice synchroniczne.



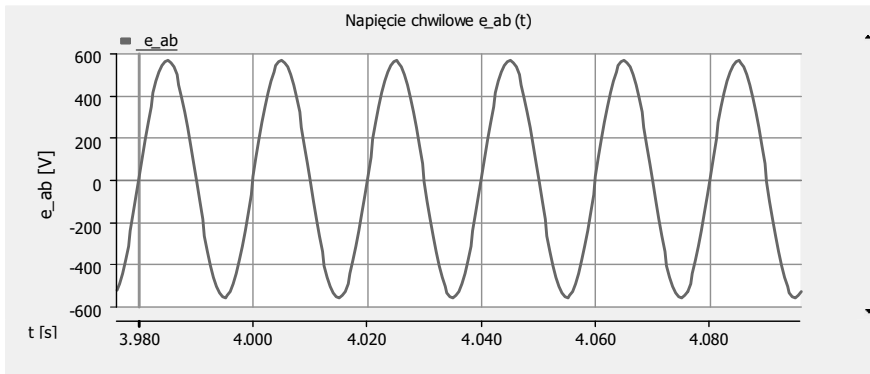
Rys. 4. Model trójfazowej prądnicy synchronicznej prądu przemiennego wraz z regulatorem napięcia [7]

Fig. 4. Model the three-phase synchronous AC generator with voltage regulator

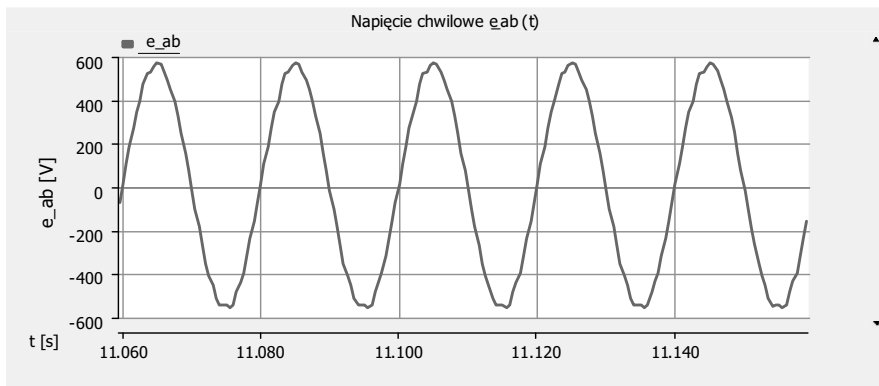
3. WSTĘPNA WERYFIKACJA SYMULACYJNA SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO STATKU „HORYZONT II”

Wstępną weryfikację symulowanego systemu elektroenergetycznego statku m/v „Horyzont II” przeprowadzono w stanie zarówno statycznym, jak i dynamicznym. Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi chwilowe napięć symulowanych na szynach głównych rozdzielnic. Przy załączeniu odbiornika liniowego rezystancyjno-indukcyjnego napięcie ma przebieg sinusoidalny. Po załączeniu dodatkowo odbiornika nieliniowego przebieg napięcia zasilającego zostaje zniekształcony.

a)



b)

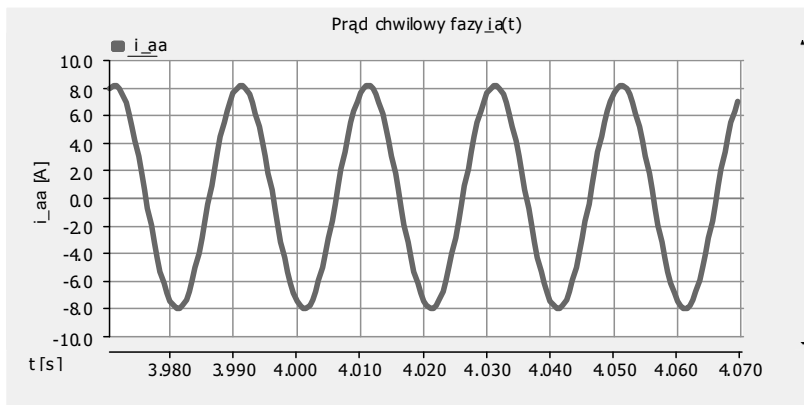


Rys. 5. Przebiegi chwilowe napięcia symulowane na szynach głównych rozdzielnicy:
a) załączony odbiornik liniowy, b) załączony odbiornik nieliniowy

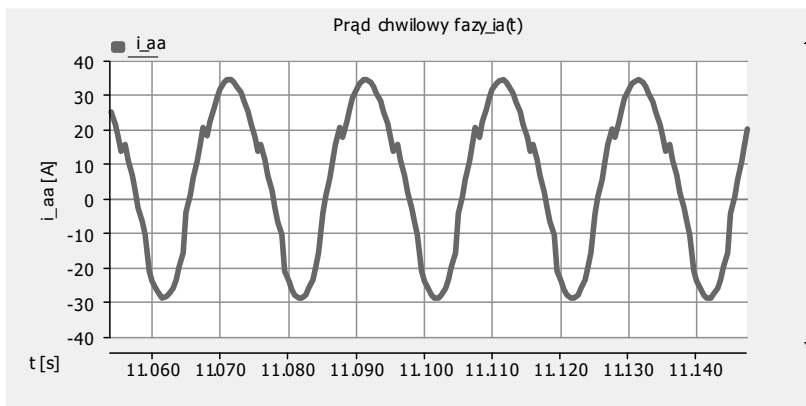
Fig. 5. Waveforms of voltage rails simulated on the main switchboard:
a) a linear receiver attached, b) a non-linear receiver attached

W przypadku prądów symulowanych pobieranych z prądnicy można zauważyć podobną tendencję jak przy napięciach chwilowych. Przy załączeniu odbiornika liniowego prąd płynący przez odbiornik ma przebieg sinusoidalny. Po załączeniu odbiornika nieliniowego, przebieg prądu zostaje zniekształcony (rys. 6).

a)



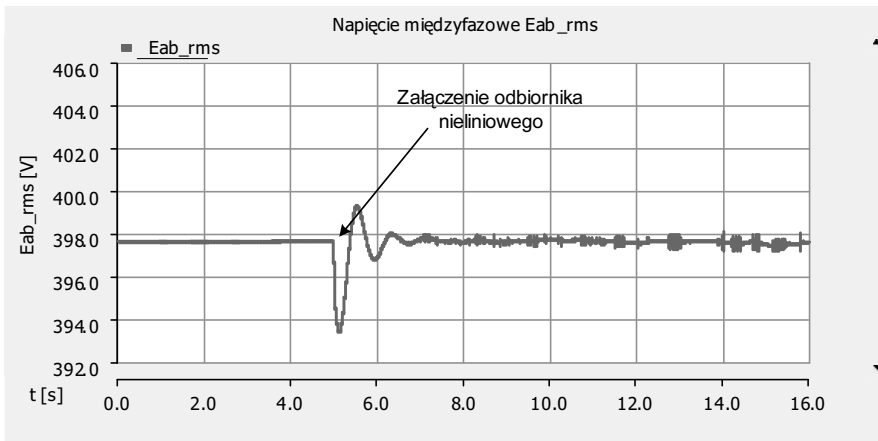
b)



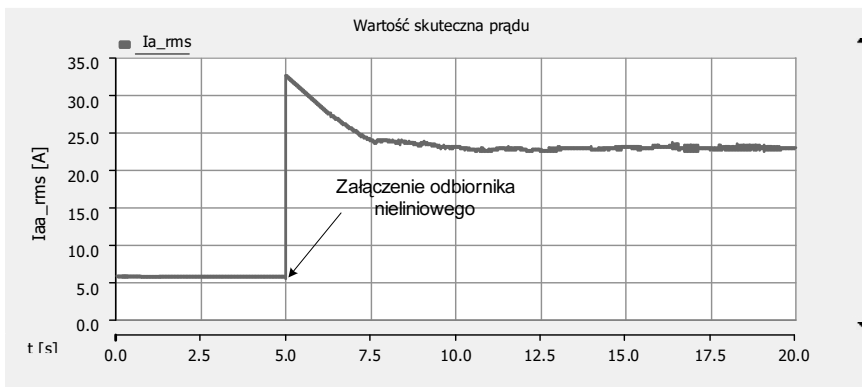
Rys. 6. Przebiegi chwilowe prądu symulowane na szynach głównych rozdzielnic
a) załączony odbiornik liniowy, b) załączony odbiornik nieliniowy

Fig. 6. Waveforms of current simulated on the rails of the main switchboard:
a) a linear receiver attached, b) a non-linear receiver attached

Wartość skuteczna napięcia symulowana na szynach głównych rozdzielnic (rys. 7) utrzymywana jest za pomocą regulatora napięcia na poziomie 397,7 V. Po załączeniu odbiornika nieliniowego dużej mocy napięcie osiąga wartość minimalną 393,6 V i po czasie regulacji 2,97 s przyjmuje wartość ustaloną. Na rysunku 8 przedstawiono przebieg wartości skutecznej prądu pobieranego przez odbiorniki. Po zwiększeniu stałej czasowej regulatora napięcia następuje wydłużenie czasu regulacji wartości skutecznej napięcia.

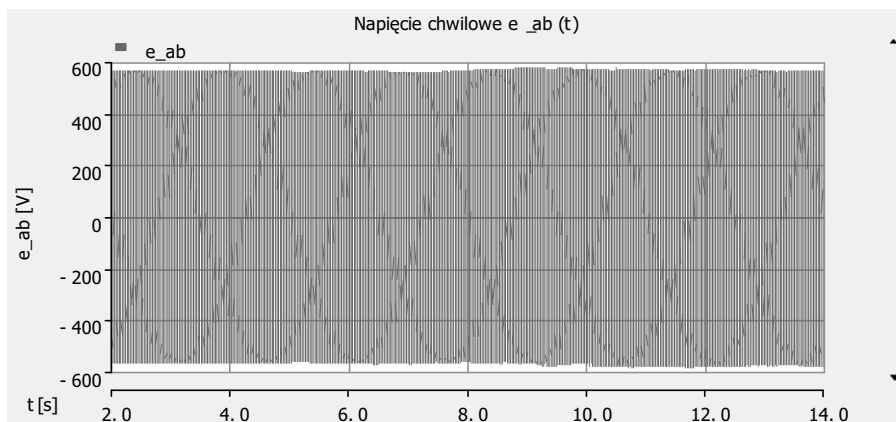


Rys. 7. Wartość skuteczna napięcia symulowana na szynach głównych rozdzielnic
Fig. 7. The RMS voltage simulated on the rails of the main switchboard



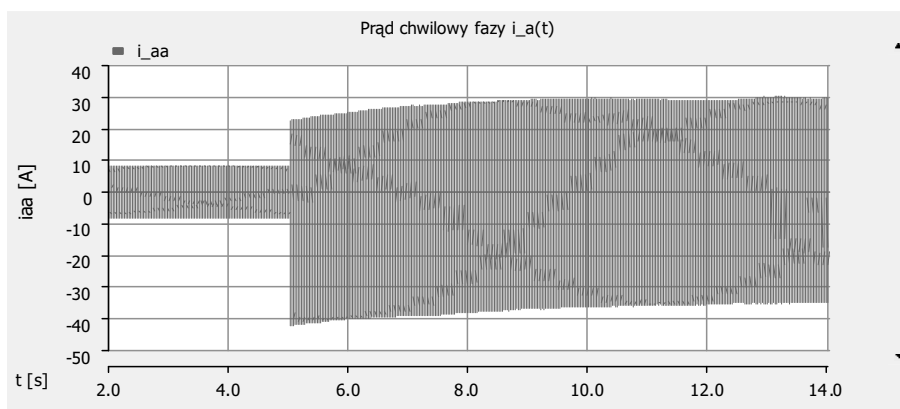
Rys. 8. Wartość skuteczna prądu symulowana na szynach głównych rozdzielnic
Fig. 8. RMS current simulated on the rails of the main switchboard

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przebiegi chwilowe napięcia i prądu zasymulowane na szynach głównych rozdzielnic. Przebieg napięcia praktycznie zachowuje stałą amplitudę przez całą symulację, tylko w momencie załączenia odbiornika nieliniowego następuje niewielkie zniekształcenie. Natomiast przebieg chwilowy prądu zachowuje stałą amplitudę podczas obciążenia prądnicy odbiornikiem liniowym o niewielkim obciążeniu. Po załączeniu odbiornika nieliniowego dużej mocy uwidacznia się stan nieustalony przebiegu prądu.



Rys. 9. Przebieg napięcia chwilowego symulowanego na szynach głównych rozdzielnic

Fig. 9. The simulated voltage on the rails of the main switchboard



Rys. 10. Przebieg napięcia chwilowego symulowanego na szynach głównych rozdzielnic

Fig. 10. Voltage simulated on the rails of the main switchboard

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono model części okrętowego systemu elektroenergetycznego statku „Horyzont II” zrealizowanego w programie PSCAD. Prezentowane przebiegi chwilowe oraz wartości skuteczne parametrów energii elektrycznej wykazują przydatność wykorzystania programu PSCAD do modelowania elektroenergetycznej sieci okrętowej. Wydaje się, że wstępna weryfikacja modelu w stanie ustalonym jest zgodna z oczekiwaniami. Przebiegi chwilowe prądów i napięć, jak również ich wartości skuteczne są wielkościami, które można w rzeczywistości zaobserwować na statkach morskich. W przyszłości planowane jest przeprowadze-

nie rzeczywistych pomiarów parametrów energii elektrycznej na statku m/v „Horyzont II” i porównanie ich z prezentowanym modelem. Wiąże się to z potrzebą stworzenia modelu najważniejszych odbiorników zainstalowanych na statku. Przedstawione na rysunku 5 przebiegi chwilowe napięć dowodzą, że załączenie nieliniowego obciążenia na źródło napięcia, jakim jest prądnica synchroniczna o danych parametrach, powoduje odkształcenie przebiegu napięcia zasilającego odbiornik. Czas regulacji oraz zmiany wartości skutecznych napięć mieszczą się w normach Polskiego Rejestru Statków.

Artykuł przygotowano w ramach projektu DEC-2012/07/E/ST8/01688.

LITERATURA

1. Arendt R., *Simulation investigations of ship power systems*, Environment and Electrical Engineering, IEEE 2011.
2. Friedel V., *Modeling and Simulations of a Hybrid Wind-Diesel Microgrid*, Royal Institut of Technology, Stockholm, Sweden, June 2009.
3. Prousalidis J., Muthumuni D., *Power quality on electric ship*, Flux Magazine, June 2006.
4. Simoes M.G, Palle B., Chakraborty S., *Electrical Model Development and Validation for Distributed Resources*, Colorado 2007.
5. Swarn S. Kalasi, Nayak O., *Ship Electrical System Simulation*, Electrical Schip Technologies symposium, IEEE, 2005.
6. Tarasiuk T., Mindykowski J., *Weryfikacja doświadczalna analizatora jakości energii elektrycznej na statku m/s Horyzont II*, PAK 2003.
7. *The Electromagnetic Transients and Controls Simulation Engine*, Monitoba HVDC 2010.

A MODEL OF POWER STATION OF M/V „HORYZONT II” CREATED IN THE PSCAD

Summary

In the paper presents a model of ship electricity grid made in the PSCAD X4. The object which was simulated is a school and research vessel „Horyzont II”. Synchronous generators with voltage regulators and driving diesel engines are modeled. The waveforms of current and voltage during the switching on and off the receiver (with linear and non-linear current-voltage characteristics) are shown.