

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Serguei Guerman-Gaïkin, Jarosław Hrynkiewicz,
Tomasz Jendrzeczak

**Zastosowanie technologii komputerowych do badania
układów okrętowych systemów elektroenergetycznych**

Słowa kluczowe: sieci elektroenergetyczne okrętowe, analiza komputerowa sieci

Układy sterowania okrętowymi systemami elektroenergetycznymi są zbiorami powiązanych wzajemnie urządzeń (podsystemów), przeznaczonych do wytwarzania, przekształcania i rozdziału energii elektrycznej. Niezawodność pracy systemu elektroenergetycznego jest zakładana jeszcze w stadium projektowania i budowy statku. Badanie takich układów elektroenergetycznych jest możliwe tylko z wykorzystaniem współczesnej techniki komputerowej, oparte na stworzeniu modelu matematycznego systemu, a następnie na jego analizie za pomocą uniwersalnych pakietów oprogramowania matematycznego (takich jak MatLAB lub MatCAD) lub z wykorzystaniem specjalistycznych programów tworzonych w językach Fortran, Pascal, C itp.

**Applications of Computer Technologies for Examining
the Ship Electrical Power System**

Key words: ship electrical power system, computer aided network analysis

This paper presents principles of simulations of ship electrical systems featuring new software such as MatLAB, MatCAD and other programs.

1. Okrętowe układy elektroenergetyczne

Współcześnie w projektowaniu okrętowych układów elektroenergetycznych można wykorzystywać szereg programów komputerowych. W pierwszej kolejności należy wymienić pakiet programowy Matlab wraz z jego programami narzędziowymi „Toolbox”, wśród których programy Simulink i Power System wykazują największą przydatność do analizy i syntezy systemów elektroenergetycznych. Programy te dają projektantowi duże możliwości, począwszy od strukturalnego (matematycznego) sformułowania systemu, a kończąc na generowaniu kodów oprogramowania mikroprocesorowego.

Obecnie do projektowania elektronicznych układów sterowania stosuje się również szereg pakietów programowych. Układy te w części informacyjnej wypełniają rozliczne funkcje. Są to przede wszystkim funkcje sterowania, w tym formowanie sygnału sterowania układem w zależności od wymagań technologicznych, formowanie ograniczeń zmiennych stanu układu np. napięć, prądów, prędkości, ciśnienia, temperatury itp. Do tych celów okazały się przydatne takie pakiety programowe jak: OrCAD-9 Realise, DesignLab, Workbench, Circuit Marker i inne.

Największymi możliwościami dysponuje pakiet OrCAD-9, integrujący zagadnienia analizy, syntezy, obliczeń i konstrukcji układów elektronicznych i dysponujący przy tym największą biblioteką (powyżej 200 000) komponentów elektronicznych.

Bogaty zestaw oprogramowania pozwala współczesnemu projektantowi zrealizować za pomocą komputera cały cykl projektowania systemu, od opracowania i zbadania koncepcji ogólnej systemu do wykonania dokumentacji roboczej.

Należy jednak podkreślić, że w toku realizacji tych zadań wynikają problemy, które mogą być rozwiązane tylko przy dogłębnym poznaniu zjawisk fizycznych we wszystkich ogniwach układu. Fachowe wykorzystanie komputera wymaga bowiem znajomości i zrozumienia fizyki pracy poszczególnych elementów układu i ich wzajemnych powiązań oraz współzależności.

Budowa modelu komputerowego jest zadaniem twórczym. Podstawowym zagadnieniem badania jest adekwatne wykorzystanie pakietów programowych do realizacji konkretnego zadania. Powoduje to zmianę w początkowej fazie procesu twórczego w pracy badawczej, który teraz sprowadza się do wyboru odpowiedniego pakietu programowego i umiejętnego wykorzystania tego pakietu oraz metod matematycznych w nim zawartych, a następnie umiejętnego opracowania i przedstawienia otrzymanych wyników.

Wynika stąd konieczność nie tylko znajomości procesów fizycznych zachodzących w złożonych układach elektrycznych, ale także wiedzy o możliwościach

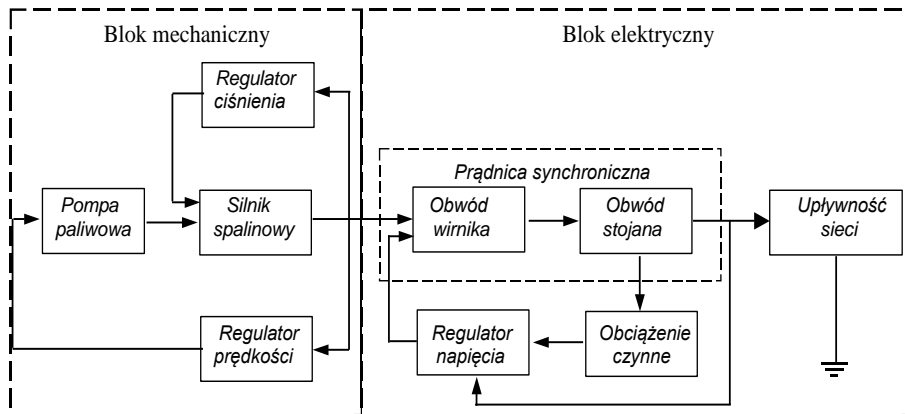
komputera w realizacji konkretnego zadania. Dlatego nie można traktować komputera tylko jako narzędzia do rozwiązania zagadnienia, gdyż wraz z prawidłowo dobranym oprogramowaniem stanowi on metodę badania i analizy układu.

Okrętowe układy elektroenergetyczne są tworzone z elementów, które oddzielnie lub wspólnie można analizować pod różnymi względami, np. konstrukcji, sterowania, diagnostyki czy zabezpieczeń.

Okrętowy zespół prądotwórczy (rys. 1) posiada dwa bloki:

- mechaniczny,
- elektryczny.

Pierwszy blok obejmuje silnik spalinowy wraz z regulatorami ciśnienia, prędkości obrotowej i pompą paliwową, natomiast blok drugi składa się z prądnicy synchronicznej z regulatorem napięcia, obciążenia oraz upływności sieci. Upływność sieci (stosowane również pojęcia – sieć upływnościowa, lub sieć bierna) składa się z rezystancji izolacji sieci elektroenergetycznej względem kadłuba statku oraz pojemności fazowych występujących pomiędzy fazami sieci a kadłubem, ma zatem charakter bierny – pojemnościowy. Właśnie rezystancje i pojemności mają istotny wpływ na bezpieczeństwo pożarowe i porażeniowe na statku.



Rys.1. Schemat blokowy sterowania okrętowego systemu elektroenergetycznego
Fig.1. Block diagram of ships electrical control system

Jedną z głównych właściwości omawianego układu jest to, że charakterystyki statyczne i dynamiczne bloków mechanicznego i elektrycznego znacząco wpływają na parametry i charakterystyki upływności sieci, a tym samym na bezpieczeństwo pożarowe i porażeniowe. Dlatego badania bezpieczeństwa pożar-

rowego i przeciwporażeniowego należy realizować z uwzględnieniem procesów zachodzących w obu wymienionych powyżej blokach [53, 63].

Do symulowanych zakłóceń należy zaliczyć przede wszystkim skokowe zmiany obciążenia oraz zniekształcenia sinusoidalnego kształtu prądu i napięcia. W ostatnich latach, w związku z szerokim zastosowaniem przekształtników półprzewodnikowych problemy związane ze zniekształceniami prądów i napięć nabrały pierwszorzędного znaczenia.

Wzrost stosowania przekształtników energoelektronicznych spowodował, że moc zainstalowana przekształtników energoelektronicznych zbliża się do mocy zainstalowanej źródeł energii elektrycznej. Przekształtniki energoelektroniczne generują harmoniczne prądu i napięcia o częstotliwości od kilku herców do dziesiątków megaherców, które w znaczący sposób wpływają na elementy układu energetycznego.

Ważny wpływ na efektywność kompensacji wywiera również niestabilność częstotliwości sieci. Zgodnie z wymaganiami towarzystw klasyfikacyjnych wahania częstotliwości nie mogą przekraczać $\pm 5\%$ częstotliwości znamionowej.

Badanie stanów nieustalonych jest bardzo ważne dla analizy bezpieczeństwa pożarowego i porażeniowego a także ze względu na identyfikację fazy, w której nastąpiło zakłócenie. W opracowaniach z zakresu ochrony przeciwpożarowej i przeciwporażeniowej nie były uwzględniane rzeczywiste parametry źródeł energii.

Badanie przedstawionego powyżej układu jest możliwe tylko z wykorzystaniem współczesnej techniki komputerowej, przy czym można stosować dwie metody postępowania.

Metoda pierwsza – klasyczna, polega na stworzeniu modelu matematycznego systemu, a następnie na jego analizie za pomocą uniwersalnych pakietów oprogramowania matematycznego (takich jak MatLAB lub MatCAD) lub z wykorzystaniem specjalistycznych programów tworzonych w językach Fortran, Pascal, C, C++ itp.

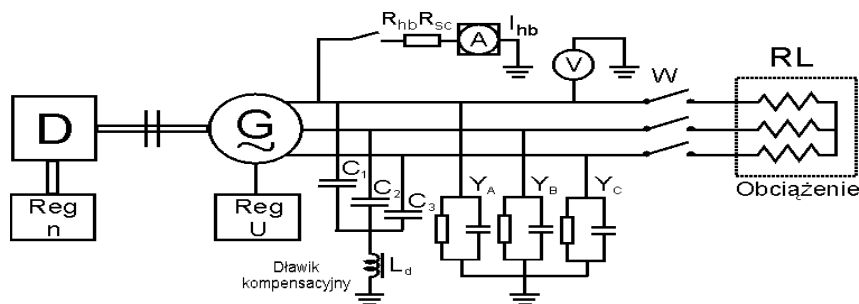
Metoda druga, umożliwiona rozwojem oprogramowania komputerowego w ostatnich latach, oparta jest na najnowszych pakietach programowych – Simulink, OrCAD 9.2, TCAD itd.

Biblioteki tych pakietów zawierają modele wirtualne, pozwalające uwzględnić wszystkie właściwości fizyczne rzeczywistych urządzeń. Umożliwia to częściowe uproszczenie pracochłonnego i często trudnego w realizacji procesu budowy modelu matematycznego. Wymaga to jednak dogłębnej znajomości fizycznego działania systemu i jego składników. Prócz tego metoda ta nie wymaga potrzeby znajomości szczegółów oprogramowania oraz metod matematycznych w nim ujętych, gdyż pozwala na rozwiązywanie komplikacji i sprzeczności mogących wystąpić w pracy modelu.

Niemniej jednak przy korzystaniu z drugiej metody większą wagę mają fizyczne podstawy procesów zachodzących w układzie i z tej przyczyny w niniejszej pracy ją zastosowano.

2. Uogólniony model okrętowego systemu elektroenergetycznego w pakiecie Simulink

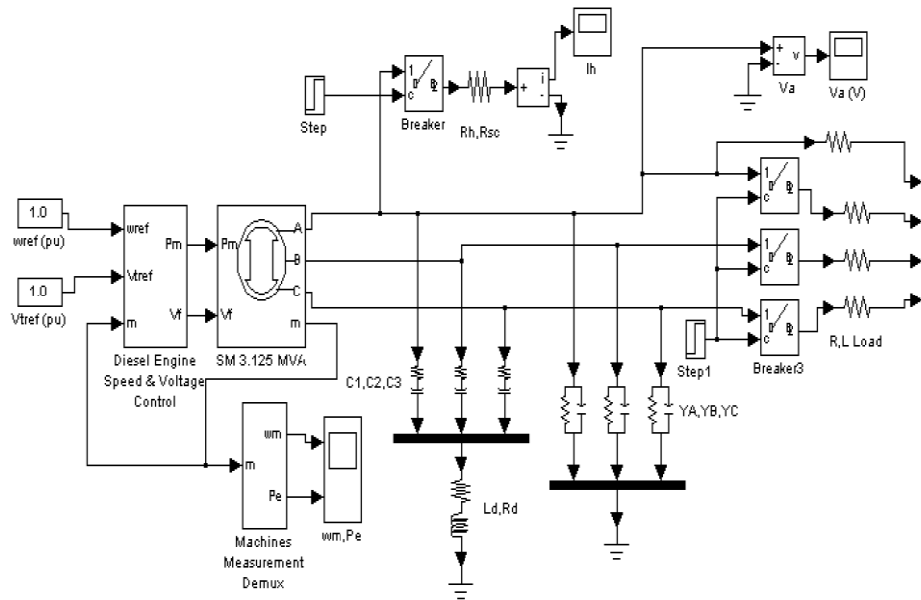
Okrętowy system elektroenergetyczny można schematycznie przedstawić (rys. 2) jako zespół prądowców zasilający sieć AC.



Rys. 2. Schemat okrętowego systemu elektroenergetycznego
Fig. 2. A ship electrical system

Uogólniony model okrętowego systemu elektroenergetycznego zrealizowany w pakiecie Simulink pokazano na rysunku 3. Model zawiera:

- silnik spalinowy z regulatorami prędkości i napięcia (blok Diesel Engine Speed & Voltage Control);
- prądnicę synchroniczną (blok SM 3, 125 MVA);
- obciążenie (R, L Load) włączane przez łączniki (Breaker 3), w pierwszym etapie badań analizowano procesy zachodzące przy obciążeniu liniowym, sieć upływnościowa skompensowana przedstawiona w postaci admitancji zespolonych (Y_A , Y_B , Y_C) dławika liniowego (L_d , R_d) i trzema pojemnościami tworzącymi sztuczny punkt zerowy (C_1 , C_2 , C_3);
- obwód modelujący porażenie człowieka lub uszkodzenie izolacji fazy względem kadłuba (Breaker, R_h , R_{sc}).



Rys. 3. Model okrętowego systemu elektroenergetycznego
 Fig. 3. A model of ship electrical system

Wszystkie parametry układu zostały oparte na dokumentacji technicznej statku oraz wynikach badań przeprowadzonych przy wdrażaniu urządzenia do kompensacji prądów pojemnościowych.

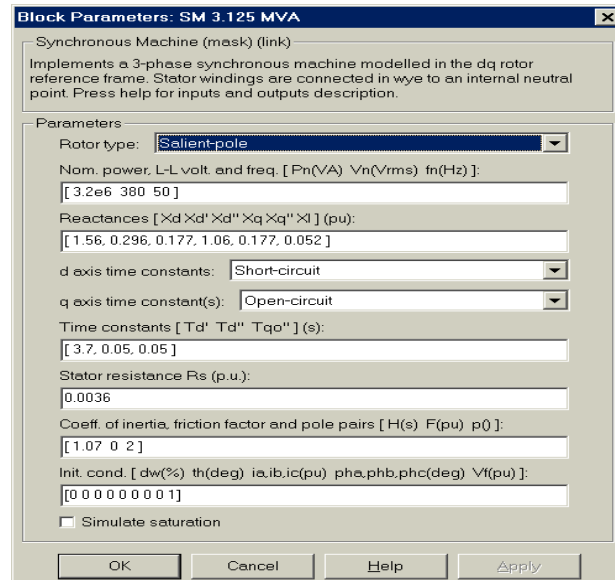
Jak wynika z rysunku 3, część bloków zrealizowano w postaci modelu matematycznego, a część jako modele wirtualne. Modelami wirtualnymi są prądnica synchroniczna, obciążenie i sieć upływnościowa, natomiast układy sterowania i regulacji silnika spalinowego są modelami matematycznymi.

Na rysunku 4 przedstawiono okno dialogowe wirtualnej prądnicy synchronicznej. W polach okna wpisano założone parametry prądnicy.

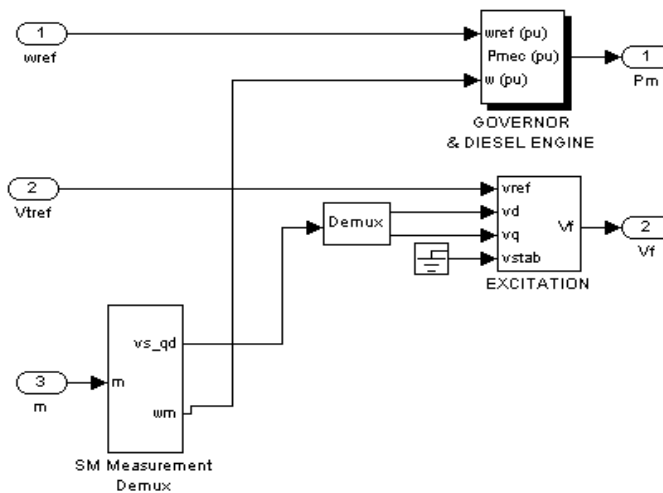
Blok regulatorów pokazano na rysunku 5. Blok ten zawiera silnik spalinowy z regulatorami prędkości i ciśnienia (GOVERNOR & DIESEL ENGINE), regulator napięcia prądnicy (EXCITATION) oraz blok pomiarowy zmiennych stanu prądnicy (SM Measurement).

Schemat strukturalny silnika spalinowego wraz z regulatorem prędkości i regulatorem ciśnienia zamieszczono na rysunku 6.

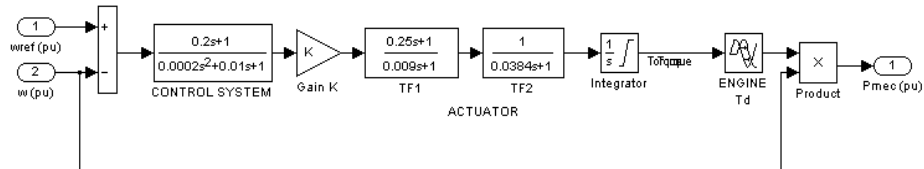
Schemat strukturalny regulatora napięcia podano na rysunku 7.



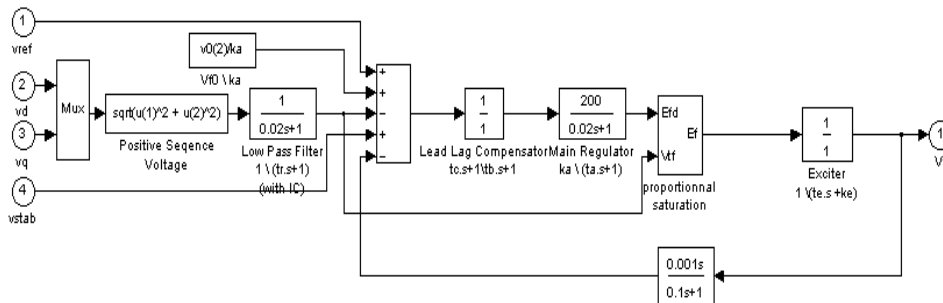
Rys. 4. Parametry wirtualnej prądnicy synchronicznej
 Fig. 4. Parameters of virtual synchronous generator



Rys. 5. Model regulatorów okrętowego systemu elektroenergetycznego
 Fig. 5. A model of shipelectrical power regulators system



Rys. 6. Schemat strukturalny części mechanicznej okrętowego systemu elektroenergetycznego
 Fig. 6. A structural diagram of the mechanical part of ship electrical system



Rys. 7. Schemat strukturalny regulatora napięcia
 Fig. 7. A block diagram of a voltage regulator

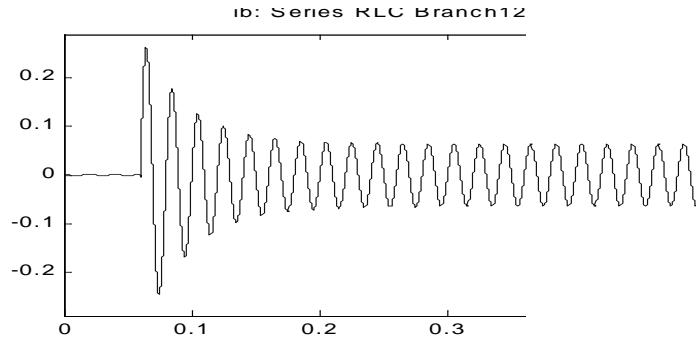
4. Wykorzystanie modelu systemu do badań prądów upływnościowych

Przykładem wykorzystania modelu systemu elektroenergetycznego mogą być badania przewidywanych efektów kompensacji prądów upływności tworzących na statku wirtualną AC.

Kompensacja parametryczna dla założonych wartości pojemności ($C_{ph} = 5\mu\text{F}$) doziemnych sieci okrętowej może być badana dla stabilnych parametrów sieci (rys. 8).

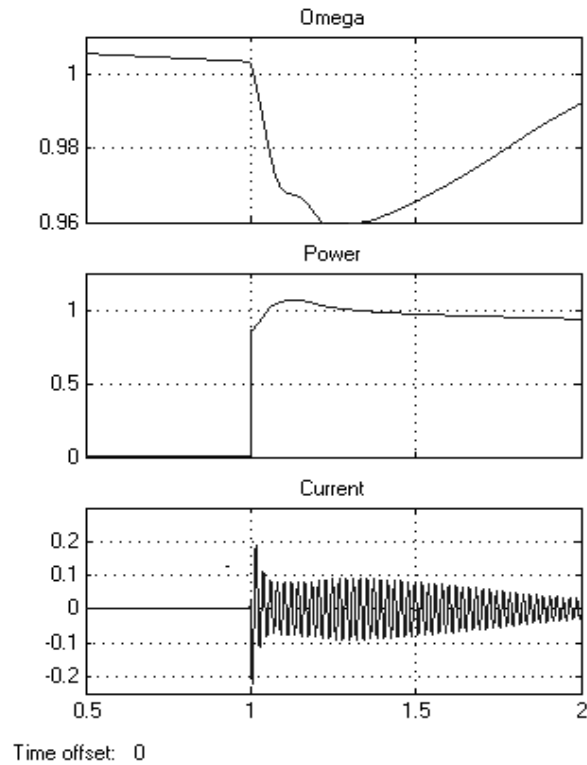
Dla dynamicznych zmian obciążenia efekt kompensacji (rys. 9 current) osiągamy po znacznie dłuższym czasie.

Dynamiczne zmiany obciążenia sieci i efekty kompensacji przedstawiono na rysunku 10, nawet dla podwyższonych parametrów doziemnych sieci okrętowej.



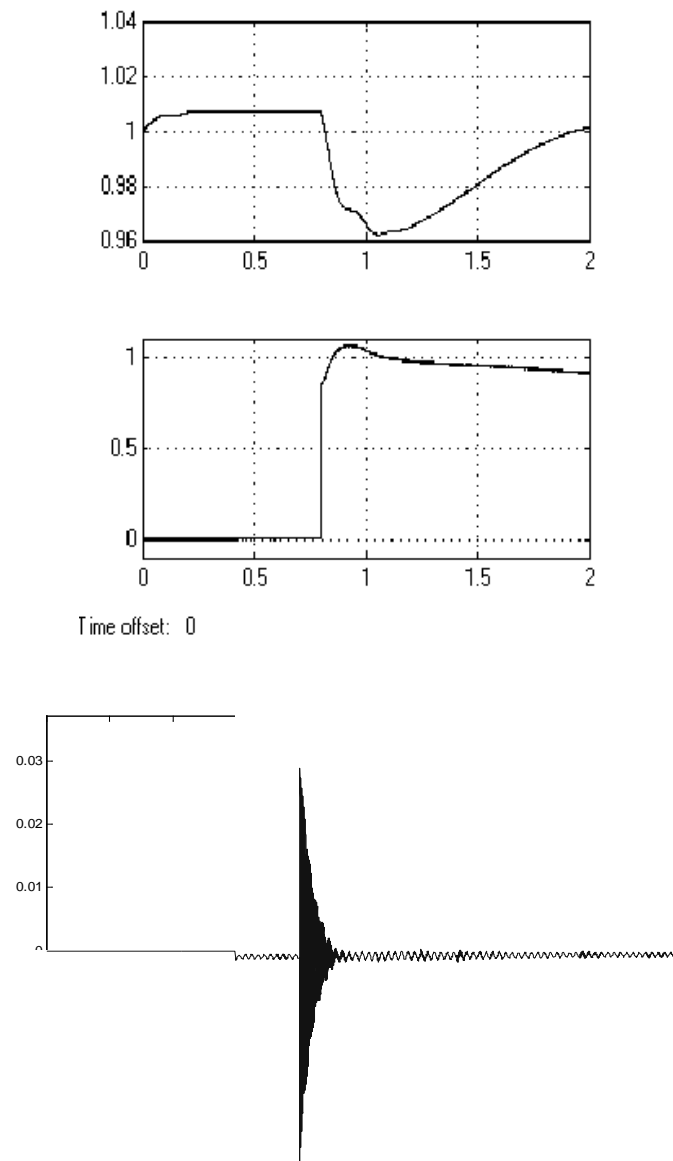
Rys. 8. Przebieg czasowy prądu rażenia w sieci symetrycznej z kompensacją parametryczną, przy $C_{ph} = 5 \mu\text{F}$, $L_c = 1,0 \text{ H}$, $R_{hb} = 1000 \Omega$

Fig. 8. A time chart of shock current in the symmetric system with parameter compensation for $C_{ph} = 5 \mu\text{F}$, $L_c = 1.0 \text{ H}$, $R_{hb} = 1000 \Omega$



Rys. 9. Przebiegi czasowe w układzie elektroenergetycznym z kompensacją parametryczną

Fig. 9. A time chart for an electrical system with parameter compensation



Rys. 10. Przebiegi czasowe w układzie elektroenergetycznym z kompensacją parametryczno-aktywną, przy $C_{ph} = 10/10/10 \mu\text{F}$, $L_c = 0.67 \text{ H}$, $R_{hb} = 1000 \Omega$
Fig. 10. Time chart for the electrical system with parameter-active compensation for $C_{ph} = 10/10/10 \mu\text{F}$, $L_c = 0.67 \text{ H}$, $R_{hb} = 1000 \Omega$

Wnioski

Badanie systemu elektroenergetycznego statku w pakiecie Simulink pozwala na szybką ocenę projektowanego rozwiązania przez porównanie efektów kompensacji prądów rażenia w warunkach statycznych i dynamicznych dla:

- kompensacji parametrycznej (regulowanym dławikiem liniowym),
- kompensacji parametryczno-aktywnej z dławikiem i konwertorem impedancji.

Podobnie można badać inne rozwiązania sterowanych układów kompensacji i oceniać ich przyszłe efekty na statku.

Literatura

1. Żdankin V. K., *Nekotorye voprosy obespečeniâ vzryvobesopasnosti oborudovaniâ*, STA, 1998, nr 2.
2. Hrynkiewicz J., Saharov V. V., *Nablúdateli i ocenivатели sostoânia v sudovyh sistemah upravleniâ*, V: SPBGUVK 2001, s. 194.
3. Hrynkiewicz J., *Konceptual'nye osnovy, informacionnoe i apparatnoe obespečenie bezopasnosti èrgatičeskikh sistem upravleniâ sudovymi èlektròenergetičeskimi kompleksami*. Disseptaciâ na soiskanie učenoj stepeni d. t. n. Special'nost' 05.13.06 Avtomatizipovannye sistemy upravleniâ tehnologičeskimi processami i proizvodstvom. Rozprawa habilitacyjna na SPBGUVK, SPB 2001, s. 332 + priloženie 102 s.
4. German-Galkin S. G., Hrynkiewicz J., *Analiz sredstv zaščity čeloveka i sudna pri povreždeniâh v èlektričeskikh setâh*, V: Konf. SZPI St. Petersburg 2000, s. 9.
5. German-Galkin S. G., Hrynkiewicz J., *Analiz kompensiruûščih ustroistv èlektroseti tipa IT*, V: Konf. MHTK SEE – 2000. Frunze Ukraina, s. 4.
6. German-Galkin S. G., Hrynkiewicz J., *Vniânie gapmonik na kompensaciû emkostnyh tokov v seti tipa IT*. 7 Mežd.Konf. «Mašinstroenie i tehnosfera na rubeže 21 veka». 11-17.09.2000. Sevastopol, Ukraina.
7. German-Galkin S. G., Hrynkiewicz J., *Sistemy kompensaci tokov povpeždeniâ v sudovyh èlektričeskikh setâh*, Vestnik Harkovskogo Gosudarstvennogo Politehničeskogo Universiteta, Seriâ "Èlektrotehnika, Èlektronika i Èlektroprivod". Vyp. 113. Har'kov 2000, s. 164 – 166.
8. Ivanov E. A., *Osnovnye zadači v oblasti metodičeskogo i apparatnogo obespečeniâ uslovij bezopasnosti pri èkspluatacii sudovyh ÈÈS*, Ustpojstva zaščity ot poraženiâ èlektrotokom i vosniknovenie požarov sudovyh ÈÈS. Sbornik VNTO im. ak. Krylova. Vyp. 484, L.: Sudostroenie, 1990.

9. Kacman F. M., *Formalizovannyj analiz bezopasnosti – prioritetnoe napravlenie deâtel'nosti IMO i MAKO*, Doklad, 1998.
10. Kacman F. M., Ivanov M. V., *Konflikty i ih vliânie na bezopasnost' na transporte*, "Aktual'nye problemy na transporte". Sbornik naučno-tehničeskikh trudov. Tom 1. SPB.–2001, s. 92 – 100.
11. Konovalenko L. K., Konovalenko A. V., *Tehnika bezopasnosti pri èkspluatacii èlektroustanovok na morskome transporte*, L.:Transport, 1977.
12. Korž N. A., *O mehanizmie èlektrotravm*, Promyšlenna ènergetika, 1982, nr 9.
13. Manojlov V. È., *Osnovy èlektrobezopasnosti*, Ènergoatomizdat, 1991.
14. Nikiforovskij N., Brunav Â., Tat'ânčenko Û., *Èlektropożarbezopasnost' sudovyh èlektričeskikh sistem*, L.: Sudostroenie, 1978.
15. Râbinin I. A., *Nadižnost', živučect' i bezopasnost' korabel'nyh èlektroènergetičeskikh sistem*, VMA im. N. G. Kuznecova, SPB.: 1997.
16. Ščuckij V. I., Kornilûk V., *Veroâtnostno-statističeskaâ model' dlâ rasčeta parametrov i pokazatelej èlektrobezopasnosti pri vozdejs'tvii toka častotoj 50 Gc*, Izvestiâ vuzov. Ènergika. Nr 4, 1990.
17. Ščuckij V. I., Najdenov A. I., *Principy postroeniâ sistemy upravleniâ èlektrobezopasnosti*, Bezopasnost' truda s promyšlennosti. 1990, Nr 12.
18. Biegelmeier G., Mikisch J., *Über den Einfluss der Haut auf die Körperimpedans des Menschen*, E und M. 1980, H.9.
19. Biegelmeier G., *Neue Erkenntnisse der Elektropathologie*, E und J. 1989, H.1.
20. Biegelmeier G., *Electrical impedance of the human body*, Symposium Toronto 1981, Pergamon Press, Toronto 1982.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Tadeusz Dąbrowski, prof. WAT
prof. dr hab. Yury Kravtsov

Adresy Autorów

prof. dr hab. inż. Serguei Guerman-Galkin
dr hab. inż. Jarosław Hrynkiewicz
mgr inż. Tomasz Jendrzejczak
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej
ul. Wały Chrobrego 1/2, 70-500 Szczecin