

dr inż. Ryszard Arendt, mgr inż. Andrzej Kopczyński
Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

ZASTOSOWANIE MODELI MATEMATYCZNYCH PRZY PROJEKTOWANIU PODSYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH STATKÓW

W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania modeli matematycznych oraz badań symulacyjnych przy projektowaniu podsystemów energetycznych statku. Przedstawione procedury oraz modele matematyczne zostaną włączone do systemu ekspertowego wspomagającego projektowanie statków.

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS IN DESIGN PROCESS OF SHIP POWER SYSTEMS

This paper deals with the problem of mathematical models applications and simulations in design process of ship power systems. In this paper design procedures and mathematical models of ship power systems are presented. The models will be used in expert system for aided design of ship power systems.

1. WPROWADZENIE

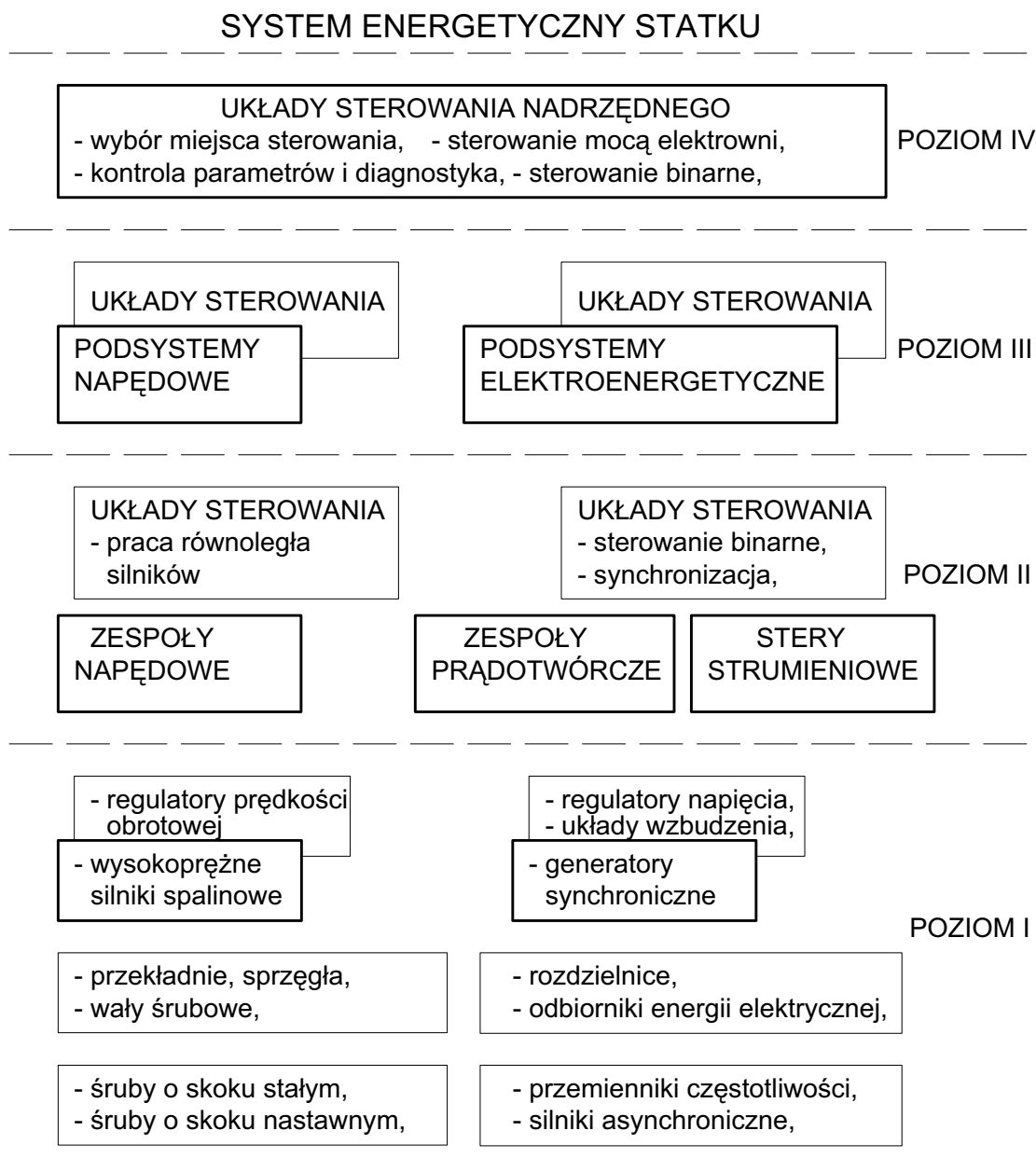
Jednym z głównych elementów wpływających na koszty i jakość produktu jest proces projektowania. Współczesne biura projektowe coraz częściej korzystają z nowoczesnych narzędzi komputerowych, co jest uzasadnione dużymi wymaganiami w stosunku do jakości i efektywności ich działań. Systemy energetyczne statków z uwagi na duże skomplikowanie, wymagają podczas procesu projektowania wykorzystania specjalizowanych aplikacji komputerowych [2, 7, 8, 10]. Ciągłe dążenie do obniżania kosztów: procesów projektowania, produkcji prototypów oraz wyrobów gotowych, skłania do poszukiwania lepszych metod projektowania [1, 4, 6, 9].

W procesie projektowania możemy wyróżnić następujące czynności:

- wybór struktury układu,
- dobór elementów składowych,
- wykonywanie obliczeń sprawdzających zgodność projektu z założeniami,
- wykonanie dokumentacji rysunkowej i opisowej.

Systemy energetyczne współczesnych statków charakteryzują się dużą różnorodnością typów elementów składowych, liczbą użytych elementów oraz strukturą ich wzajemnych powiązań (topologią). Wybrane elementy systemu mają autonomiczne układy regulacji i sterowania, natomiast podsystemy napędowe i elektroenergetyczne są nadzorowane przez układy nadrzędne. Na rys. 1. przedstawiono strukturę hierarchiczną i wielopoziomową systemu energetycznego statku.

Zagadnienia modelowania systemów energetycznych statków powinny uwzględniać stosowane elementy składowe, układy regulacji i sterowania oraz możliwe konfiguracje systemów. Pożądana jest możliwość modelowania oryginalnych rozwiązań technicznych systemów energetycznych statków – tworzenia powiązań „dowolnych” modeli elementów składowych i ocena funkcjonowania systemów z użyciem badań symulacyjnych.



Rys. 1. Struktura hierarchiczna i wielopoziomowa systemu energetycznego statku

Możemy wyróżnić następujące modele elementów składowych systemów energetycznych statków:

- wału śrubowego,
- wysokoprężnego silnika spalinowego,
- śruby o skoku stałym i nastawnym,
- sprzęgła ciernego i podatnego,
- przekładni prędkości obrotowej,
- przekładni sumującej momenty obrotowe silników,
- przekładni rozdzielającej momenty obrotowe obciążeń,

- generatora synchronicznego,
 - silnika asynchronicznego,
 - odbiornika energii elektrycznej włączanego równolegle do sieci,
- oraz modele układów regulacji i sterowania:
- regulatora prędkości obrotowej wysokoprężnego silnika spalinowego,
 - regulatora napięcia generatora synchronicznego,
 - statycznego tyrystorowego układu wzbudzenia,
 - przemiennika częstotliwości.

W referacie przedstawiono koncepcję zastosowania modeli matematycznych w procedurach projektowych, opracowaną bibliotekę modeli oraz wybrane przykładowe badania symulacyjne podsystemu energetycznego statku.

2. KONCEPCJA WYKORZYSTANIA MODELI MATEMATYCZNYCH

Modele matematyczne [12, 13] elementów składowych systemów energetycznych statków, wykorzystywane w badaniach symulacyjnych należy zweryfikować i określić obszar ich adekwatności [5]. W tym celu można dostrajać parametry istniejących modeli rzeczywistych elementów i sprawdzać przyjęte kryteria doboru. Poszczególne modele elementów składowych łączy się w całościowe struktury podsystemu energetycznego statku. Umożliwia to przeprowadzenie badań symulacyjnych zachowania się wybranych struktur podsystemów. W wyniku badań uzyskujemy możliwość oceny poprawności, jakości testowanej struktury oraz spełnienia wymogów stawianych przez towarzystwa klasyfikacyjne statków. Uzyskane wyniki są również przydatne podczas poszukiwań optymalnych w sensie przyjętego kryterium rozwiązań projektowych.

Na rys. 2. przedstawiono algorytm aplikacji generującej rozwiązania projektowe dla wybranego podsystemu energetycznego statku (np. steru strumieniowego).

Pierwszą fazą badań jest wprowadzenie przez operatora odpowiednich założeń projektowych i dobór statyczny elementów składowych struktury. Kolejnym etapem jest zestawienie modeli elementów w środowisku symulacyjnym i przeprowadzenie symulacji oraz ocena projektu stosownie do ustalonych kryteriów. Jeżeli struktura i jej elementy składowe spełniają założenia, to otrzymujemy poprawne rozwiązanie projektowe. Gdy testowany układ nie spełni założeń, wówczas ponownie dobierane są nastawy regulatora albo elementy składowe badanej struktury lub zmieniona jest struktura układu, bądź użytkownik proszony jest o zmianę założeń projektowych.

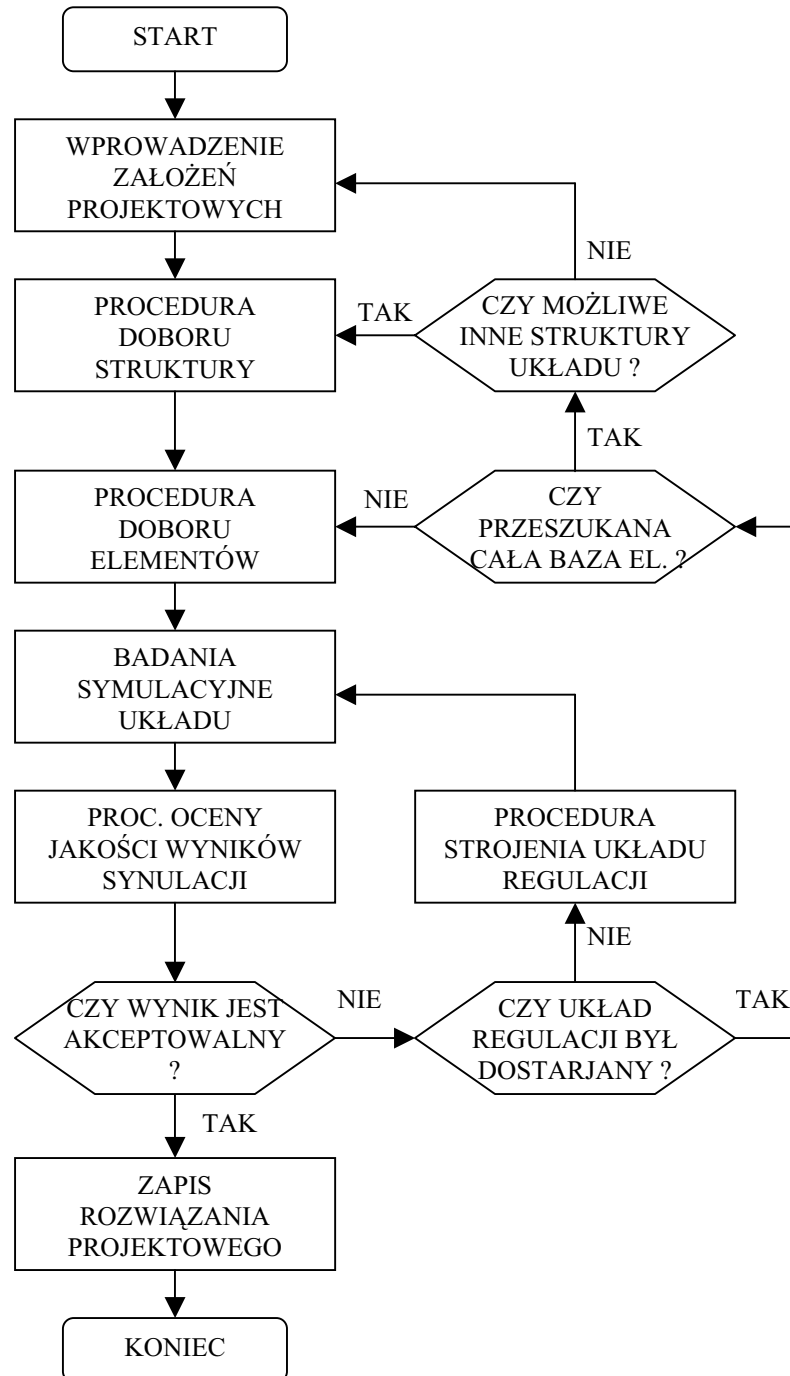
3. BIBLIOTEKA MODELI MATEMATYCZNYCH

Zredagowane modele elementów składowych systemów energetycznych statków zostały zestawione w postaci bibliotek modeli liniowych (rys. 3.) oraz modeli nieliniowych (rys. 4.).

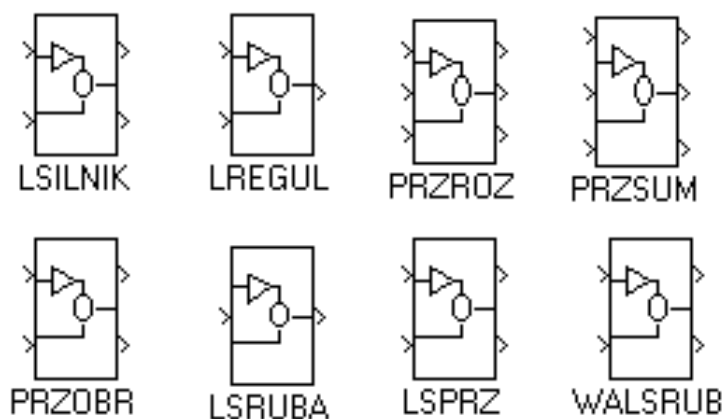
W skład biblioteki modeli liniowych włączono następujące modele:

- wysokoprężnego, okrętowego silnika spalinowego,
- regulatora prędkości obrotowej wału silnika,
- przekładni rozdzielającej momenty obrotowe na dwa odbiorniki energii mechanicznej,
- przekładni sumującej momenty obrotowe z dwóch źródeł energii mechanicznej,
- przekładni prędkości obrotowej,

- śruby o skoku stałym,
- sprzęgła podatnego,
- wału śrubowego.



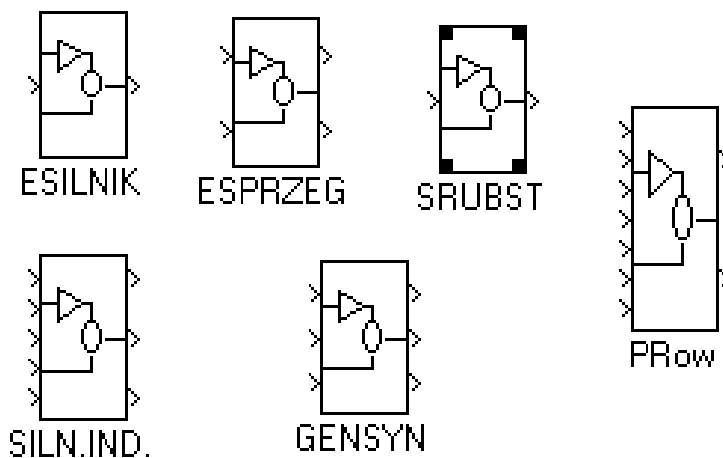
Rys. 2. Algorytm aplikacji generującej rozwiązania projektowe



Rys. 3. Modele zawarte w bibliotece modeli liniowych

W skład biblioteki modeli nieliniowych włączono następujące modele:

- wysokoprężnego, okrętowego silnika spalinowego z regulatorem prędkości obrotowej,
- sprzęgła dwustopniowego ciernego i podatnego,
- śruby o skoku stałym lub nastawnym,
- dwukłatkowego silnika indukcyjnego,
- generatora synchronicznego z regulatorem napięcia,
- obciążenia sieci okrętowej włączanego równolegle.



Rys. 4. Modele zawarte w bibliotece modeli nieliniowych

Modele matematyczne zestawione w całościowe struktury przeznaczone są do badań symulacyjnych wybranych fragmentów systemu energetycznego. Biblioteki modeli elementów składowych systemów energetycznych statków mogą być uzupełniane w miarę potrzeb.

4. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW

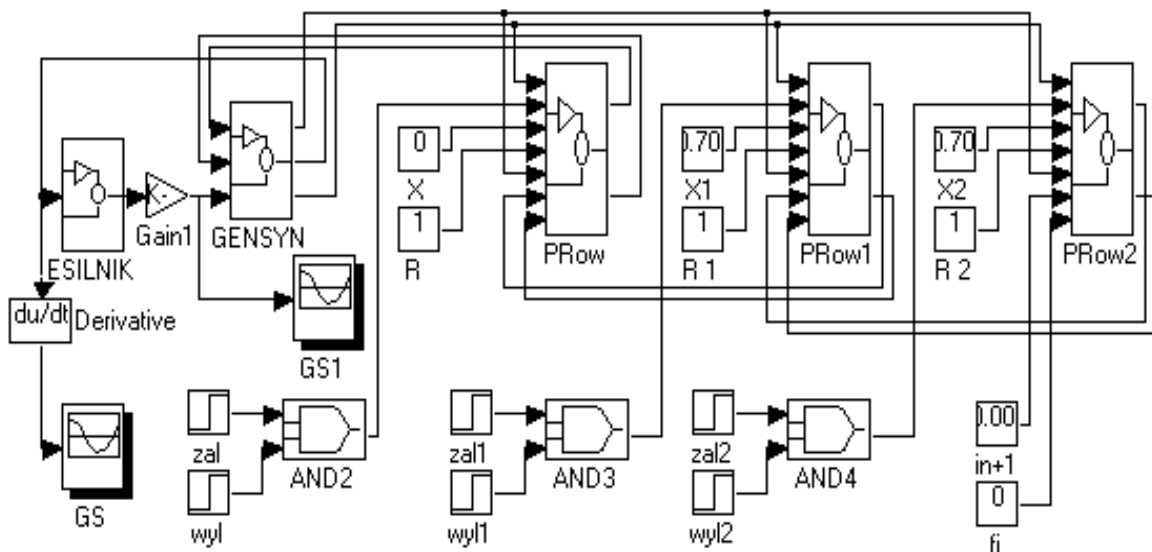
Modele matematyczne zawarte w bibliotece opisują rzeczywisty obiekt przy pomocy odpowiednich równań matematycznych. Modele te bez odpowiednich parametrów (nie zweryfikowane) są nieprzydatne do badań symulacyjnych. Nie dla wszystkich elementów (np. silnik indukcyjny) można przy pomocy obliczeń matematycznych i na podstawie danych katalogowych wyznaczyć parametry modeli. A zatem istnieje potrzeba dokonania doboru parametrów niektórych modeli matematycznych. Parametry modelu ogólnego dobierane są tak, aby zapewniały optimum kryterium bliskości charakterystyk modelu względem charakterystyk wzorca. W tym celu zdecydowano się wykorzystać opracowaną wcześniej metodę doboru parametrów przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych [3]. Jako kryterium jakości wykorzystano minimum różnicy sumy kwadratu pomiędzy odpowiedziami obiektu i modelu w określonym przedziale czasowym. Kryterium to dawało najlepsze rezultaty dla badanych obiektów.

Model ogólny (zbiór równań) wraz ze zbiorem parametrów tworzą model szczegółowy elementu np. model silnika asynchronicznego konkretnego typu, danego producenta. Modele szczegółowe są przechowywane w postaci plików utworzonych przy wykorzystaniu aplikacji symulacyjnej (np. Matlab – m-plik) oraz zbiorów tekstowych z zawartymi wartościami dobranych parametrów.

5. PRZYKŁADOWE BADANIA SYMULACYJNE

W celu oceny właściwości podsystemu elektroenergetycznego statku zredagowano model symulacyjny (rys. 5.). Przyjęto strukturę podsystemu, w skład której wchodzi:

- wysokoprężny, średnioobrotowy silnik spalinowy z regulatorem prędkości obrotowej (*ESILNIK*),
- generator synchroniczny z regulatorem napięcia (*GENSYN*),
- odbiornik energii elektrycznej o charakterze czynnym (*PRow*),
- odbiornik energii elektrycznej o charakterze czynno-indukcyjnym (*PRow1*),
- odbiornik energii elektrycznej o charakterze czynno-pojemnościowym (*PRow2*).



Rys. 5. Struktura badanego podsystemu elektroenergetycznego

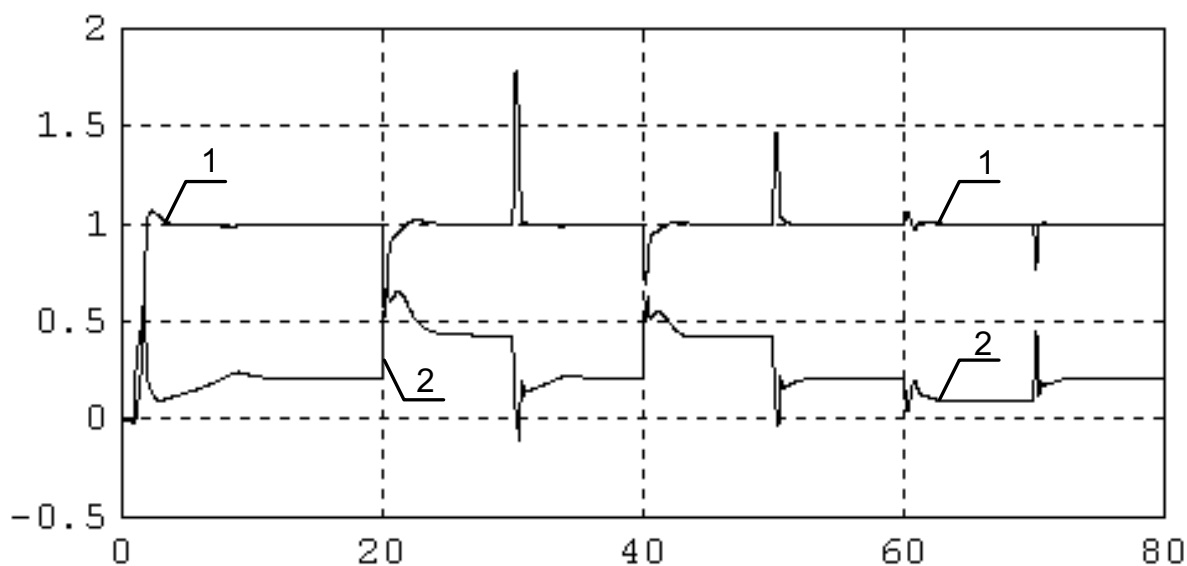
Ustalono następujący program badań symulacyjnych:

- w chwili $t = 0\text{s}$ zostaje zadana znamionowa wartość prędkości kątowej wału silnika,
- w chwili $t = 1\text{s}$ zostaje zadana znamionowa wartość napięcia generatora,
- w chwili $t = 20\text{s}$ załączany jest odbiornik energii elektrycznej P_{row} ,
- w chwili $t = 30\text{s}$ wyłączany jest odbiornik energii elektrycznej P_{row} ,
- w chwili $t = 40\text{s}$ załączany jest odbiornik energii elektrycznej P_{row1} ,
- w chwili $t = 50\text{s}$ wyłączany jest odbiornik energii elektrycznej P_{row1} ,
- w chwili $t = 60\text{s}$ załączany jest odbiornik energii elektrycznej P_{row2} ,
- w chwili $t = 70\text{s}$ wyłączany jest odbiornik energii elektrycznej P_{row2} .

Celem badań jest sprawdzenie wymagań towarzystwa klasyfikacyjnego Polskiego Rejestru Statków (PRS) [11] dotyczących:

- prędkości kątowej wału silnika w stanach ustalonych przy zakresie zmian obciążenia od 0 do wartości znamionowych; wymagane jest aby $\Delta\omega \leq 0,05\omega_{zn}$,
- prędkości kątowej wału silnika w stanach przejściowych przy odłączeniu obciążenia znamionowego; wymagane jest aby $\Delta\omega \leq 0,1\omega_{zn}$, a po upływie 5s $\Delta\omega \leq 0,05\omega_{zn}$.

Na rys. 6. przedstawiono wyniki badań symulacyjnych podsystemu elektroenergetycznego statku obejmujące przebiegi napięcia generatora (1) oraz napięcia wzbudzenia (2).



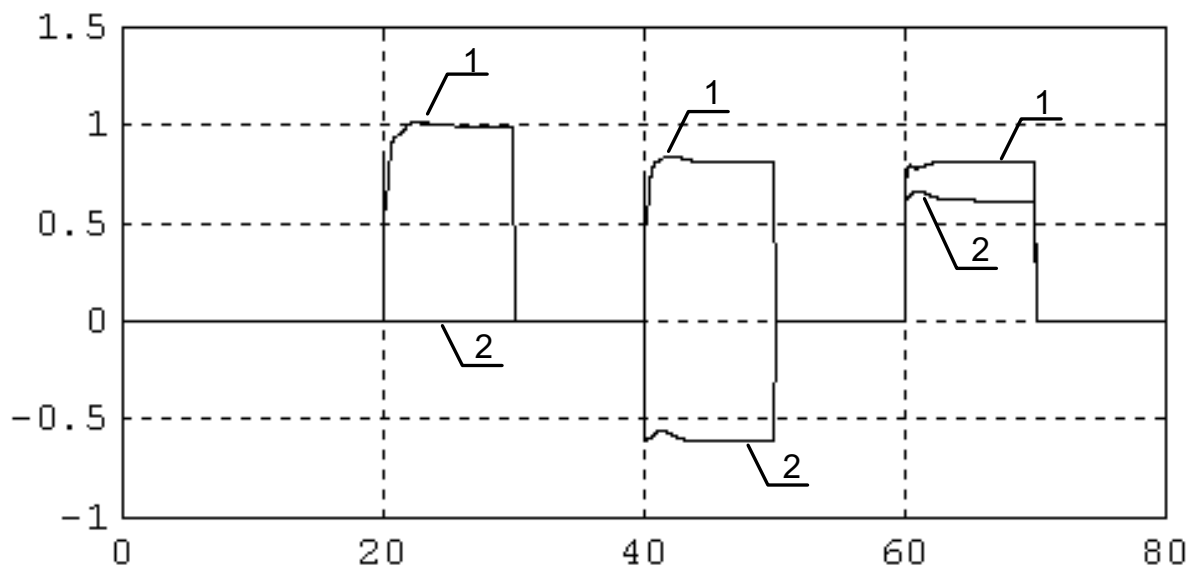
Rys. 6. Symulowane przebiegi napięcia generatora (1) oraz napięcia wzbudzenia (2). Oś rzędnych wyrażona w wartościach względnych, oś odciętych w sekundach

W chwili $t = 1\text{s}$ zostaje zadana znamionowa wartość napięcia generatora. W chwilach załączania obciążenia elektrycznego 20s, 40s i 60s występuje chwilowy spadek napięcia generatora i zmiana wartości napięcia wzbudzenia. W chwilach wyłączania obciążenia 30s, 50s i 70s występują skokowe wzrosty napięcia generatora. Przebieg napięcia w chwili $t = 60\text{s}$ dotyczy załączania obciążenia o charakterze czynno-pojemnościowym i z tego względu ma odmienny charakter.

Wymagania PRS w stanach ustalonych są spełnione. Regulator napięcia pracuje astatycznie i utrzymuje wartość znamionową. Zmiany napięcia w stanach przejściowych są zbyt duże,

zwłaszcza dla załączania i wyłączania 100% obciążenia czynnego. Należy dobrać właściwe nastawy regulatora napięcia i powtórzyć badania symulacyjne.

W celu oceny pracy generatora wykonano badania symulacyjne oceniając zmiany prądu obciążenia (1) oraz przesunięcia fazowego (2) przedstawione na rys. 7. Możliwe do zaobserwowania deformacje przednich zboczy impulsów prądu i przesunięcia fazowego wynikają z chwilowych zmian pulsacji prądu przemiennego – zmian prędkości kątowej silnika.



Rys. 7. Symulowane przebiegi prądu obciążenia (1) oraz przesunięcia fazowego (2). Oś rzędnych wyrażona w wartościach względnych, oś odciętych w sekundach

6. WNIOSKI

W referacie przedstawiono analizę hierarchicznego i wielopoziomowego systemu energetycznego statku oraz zbiór elementów składowych systemu. Przy projektowaniu podsystemów energetycznych statków można wykorzystać złożone modele matematyczne. W tym celu utworzona została biblioteka modeli matematycznych elementów składowych systemu energetycznego statku. Przedstawione w bibliotece modele podzielono na liniowe i nieliniowe. Do weryfikacji modeli zaproponowano metodę doboru parametrów modeli matematycznych przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych, przyjmując kryterium „bliskości” charakterystyk modelu i obiektu rzeczywistego.

W celu uproszczenia formalizacji opisu modeli symulacyjnych przyjęto założenia dotyczące:

- doboru zmiennych stanu „wymienianych” między modelami elementów składowych podsystemu,
- tworzenia interfejsów modeli składowych umożliwiających ich bezpośrednie łączenie między sobą,
- bliskość topologiczną modeli symulacyjnych względem schematów projektowych.

Przeprowadzone rozważania dotyczące metodyki doboru struktur modeli elementów składowych systemów energetycznych statku wykazały, że:

- przy tworzeniu modeli elementów celowe jest określenie ich struktur (interfejsów). Właściwe struktury modeli zapewniają możliwość prostego łączenia modeli składowych w dowolne konfiguracje systemu. Jednocześnie można wtedy określić proste reguły zestawiania modelu symulacyjnego;
- należy przyjąć określony poziom abstrakcji modeli. Opis matematyczny uwzględniający wartości chwilowe zmiennych stanu modeli elementów elektroenergetycznych umożliwia prostą budowę interfejsów modeli, opartą na zależnościach liniowych, komplikuje natomiast postać operatorów matematycznych modeli i wydłuża czas obliczeń numerycznych poprzez konieczność stosowania małych kroków w procedurach całkujących. Opis wektorowy umożliwia budowę modeli o prostszych operatorach matematycznych, wprowadza jednak ich nieliniowość i zwiększa niezbędną liczbę zmiennych stanu;
- bardzo istotny jest wybór zmiennych stanu wymienianych między modelami elementów składowych systemu – niezbędny zbiór zmiennych stanu zależy od charakteru opisywanych zjawisk. W systemie energetycznym statku wyróżniono podsystemy napędowe (mechaniczne) i podsystemy elektroenergetyczne;
- przy modelowaniu zjawisk przekazywania energii mechanicznej wygodnie jest przyjąć jako zmienne stanu drogę kątową wału oraz przenoszony moment sił. Przy modelowaniu zjawisk przekazywania energii elektrycznej dogodne jest użycie jako zmiennych stanu amplitud napięcia i prądu oraz przesunięcia fazowego;
- w systemach energetycznych jako zmienne stanu muszą występować dwie wielkości: uogólniony potencjał e (effort) oraz uogólniony przepływ f (flow). Wymieniane między modelami składowymi zmienne stanu muszą zapewnić możliwość odtworzenia tych wielkości. Wynika z tego, że przy opisie zjawisk przekazywania energii mechanicznej jako zmienna stanu może również wystąpić pierwsza lub druga pochodna drogi kątowej. W takim przypadku, przy stosowaniu operatorów całkowych należy odtwarzać utracone stałe wartości funkcji. Przy opisie elementów elektroenergetycznych równoważne opisy wynikają z przekształceń układu fazowego do jednego z trzech układów: składowych symetrycznych, składowych prostokątnych oraz składowych prostokątnych wirujących.

LITERATURA:

- [1] Arendt R. (2004): The application of expert system for simulation investigation in the aided design of ship power system automation. Expert system with applications, 27, 493-499.
- [2] Arendt R. (2002): An expert system for aided design of automation of ship power subsystems. Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR'2002, 2-5 September 2002 Szczecin. Proceedings vol. 2 s. 851-856.
- [3] Arendt R., Kopczyński A, Wojtczak M. (2004): The Choice of Parameters of Induction Motor Model Using a Genetic Algorithm. MMAR, Międzyzdroje.
- [4] Arendt R., Kopczyński A.(2007): Wykorzystanie środowiska ekspertowego do projektowania wybranych podsystemów energetycznych statków. Automation, Warszawa.

- [5] Arendt R., Kopczyński A., Wojtczak M., (2005): Zastosowanie modeli matematycznych przy projektowaniu steru strumieniowego i napędu elektrycznego statku. XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa.
- [6] Arendt R., Kostrzewski M., Kowalski Z., van Uden E. (2005): Struktura i wybrane procedury systemu z bazą wiedzy do projektowania automatyki podsystemów energetycznych statków. IBS PAN, XV Krajowa Konferencja Automatyki, tom 3, Warszawa.
- [7] Arendt R., Kowalski Z., Meler-Kapcia M., Zieliński S. (2001) System ekspercki projektowania automatyki statków. *Pomiary Automatyka Robotyka* 7—8/2001, 6-9.
- [8] Arendt R., Kowalski Z., Meler-Kapcia M., Zieliński S. (2001): An expert system for aided design of ship systems automation. *Expert system with applications*, Vol.20, No.3, 261-266.
- [9] Arendt R., Kowalski Z., Meler-Kapcia M., Zieliński S. (2001): System z bazą wiedzy dla wspomagania projektowania automatyki statków. Jubileuszowa Konferencja Naukowa, Jurata 5-17.
- [10] Arendt R., van Uden E. (2005): Knowledge-based system for decision-aid in ship system automation design. 11th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. CD, Międzyzdroje.
- [11] Polski Rejestr Statków (1995): Przepisy Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich. Cz. VIII. Urządzenia elektryczne i automatyzacja.
- [12] Miksiewicz R. (2000): *Maszyny elektryczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [13] Zajczyk R. (2003): *Modele matematyczne systemu elektroenergetycznego do badania elektromechanicznych stanów nieustalonych i procesów regulacyjnych*. Seria wydawnicza sekcji Sekcji Systemów Elektroenergetycznych Komitetu Elektrotechniki PAN. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.