

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

BADANIA SYMULACYJNE ROZRUCHU SILNIKA INDUKCYJNEGO STERU STRUMIENIOWEGO STATKU

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania modeli matematycznych elementów składowych steru strumieniowego statku oraz wykorzystania badań symulacyjnych przy doborze algorytmów sterowania. Przedstawione procedury oraz modele matematyczne zostaną włączone do systemu ekspertowego wspomagającego projektowanie statków.

SIMULATION INVESTIGATION OF STARTING AN INDUCTION MOTOR OF SHIP THRUSTERS

This paper deals with the problem of mathematical models applications of component elements of ship thrusters and simulations at a choice of control algorithms. The design procedures and mathematical models will be used in expert system for aided design of ship power systems.

1. WPROWADZENIE

W dzisiejszych rozwiązaniach technicznych statków powszechnie stosuje się stery strumieniowe tunelowe umieszczone poprzecznie do osi statku. Są to aktywne urządzenia sterująco-napędowe stosowane do precyzyjnego sterowania ruchem statku, przy bardzo małych prędkościach ruchu, w warunkach portowych oraz zakłóceniach ruchu wywołanych wiatrem i falowaniem. Stery strumieniowe są wykorzystywane również do dynamicznej stabilizacji położenia statku wiertniczego lub innego specjalistycznego [1, 2, 3, 7, 9].

Do wytwarzania siły naporu stosuje się następujące pędniki: śruby nastawne, śruby o skoku stałym, dysze strumieniowe, pędniki cykloidalne, pompy odśrodkowe oraz inne. Przyjmuje się rozwiązania techniczne napędu z silnikami spalinowymi, silnikami elektrycznymi, maszynami hydraulicznymi oraz turbinami parowymi lub gazowymi. Największą popularność zyskały stery strumieniowe tunelowe poprzeczne, w których do napędu stosuje się silnik indukcyjny, a pędnikiem jest śruba nastawna.

Elektrownia statku jest wydzielonym obiektem, w którym załączenie pojedynczego obciążenia, jakim jest silnik steru strumieniowego, powoduje znaczne zakłócenia. Często moc silnika indukcyjnego jest porównywalna z mocą zespołu prądotwórczego, gdzie bezpośrednie załączenie silnika spowoduje awaryjne wyłączenie zespołu i możliwość wystąpienia tzw. „blackout’u”. Zastosowanie, jako pędnika, śruby nastawnej umożliwia rozruch silnika indukcyjnego o niewielkim obciążeniu (z zerowym skokiem śruby), nie mniej jednak prąd rozruchowy silnika może przekraczać sześciokrotnie prąd znamionowy, co spowoduje „zapaść” systemu elektroenergetycznego statku, bądź przekroczenie wymagań towarzystw klasyfikacyjnych statku.

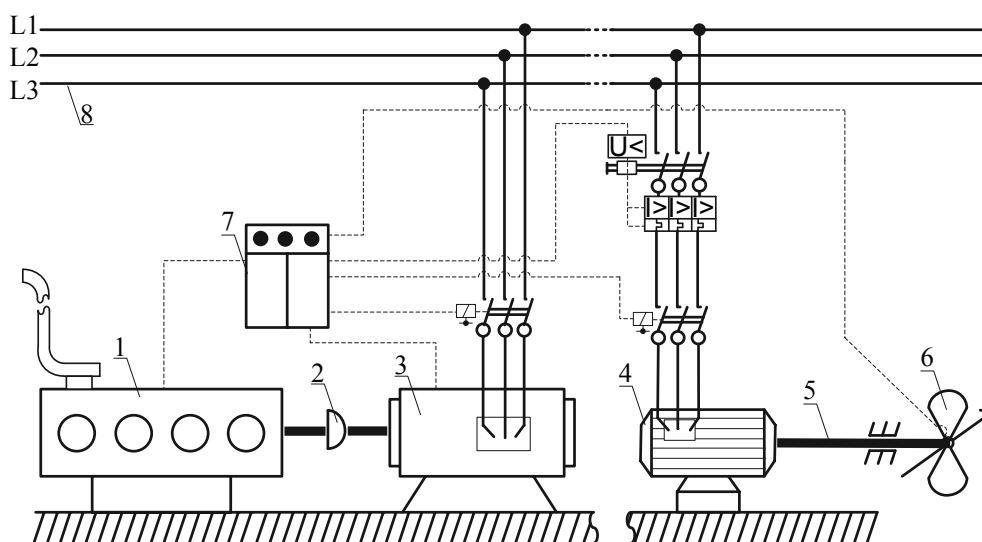
Konieczne staje się stosowanie takich metod i algorytmów sterowania pracy silnika indukcyjnego, które zapewnią bezpieczną pracę elektrowni statku w każdych warunkach i spełnienie wymagań towarzystw klasyfikacyjnych statków. Zastosowanie znalazły układy „miękkiego startu” takie jak: rozruch z użyciem przełącznika gwiazda-trójkąt, rozruch transformatorowy, stosowanie silnika pierścieniowego ze zmienną rezystancją w obwodzie wirnika, czy też zastosowanie przemienników częstotliwości (również sterowanie wektorowe).

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia doboru algorytmów sterowania silnika indukcyjnego z wykorzystaniem modeli matematycznych elementów składowych steru strumieniowego. Badania symulacyjne umożliwiły dobór sekwencji czasowych sterowania silnika indukcyjnego określonym napięciem, zapewniającym zachowanie wymagań towarzystw klasyfikacyjnych.

2. STRUKTURY STERÓW STRUMIENIOWYCH

2.1. Ster z rozruchem bezpośrednim

Przy rozruchu bezpośrednim silnika indukcyjnego (rys. 1) występują znaczne prądy rozruchowe. Moc elektrowni statku musi kilkukrotnie przekraczać moc załączanego silnika aby uniknąć wyłączenia awaryjnego. Znaczny skok prądu wprowadza duże zakłócenie w sieci elektroenergetycznej statku. Wskazane są badania symulacyjne wpływu załączania silnika na pracę generatorów synchronicznych.



Rys. 1. Schemat zespołu steru strumieniowego z rozruchem bezpośrednim

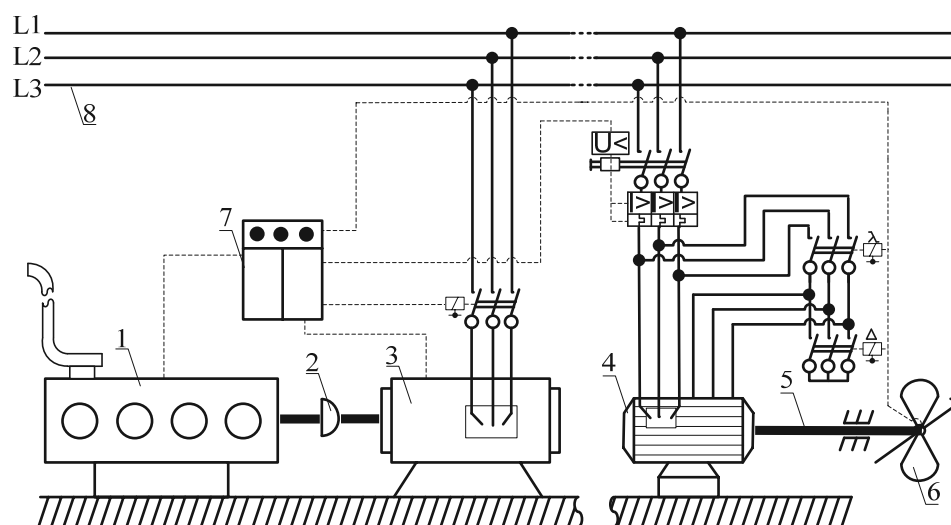
1 – silnik diesla, 2 – sprzęgło, 3 – generator synchroniczny, 4 – silnik indukcyjny, 5 – wał śrubowy, 6 – śruba o zmiennym skoku, 7 – szafa sterująca, 8 – sieć elektroenergetyczna statku

2.2. Ster z rozruchem gwiazda – trójkąt

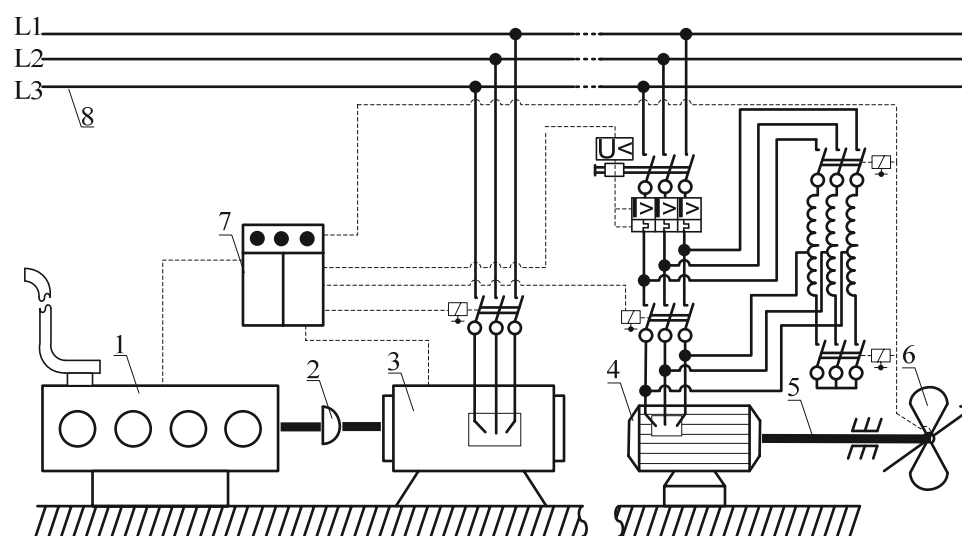
Przy rozruchu silnika indukcyjnego gwiazda – trójkąt (rys.2) prąd rozruchowy został ograniczony w stosunku do rozruchu bezpośredniego. Mimo to prąd może przekraczać trzykrotnie wartość znamionową. Należy ten fakt uwzględnić przy doborze mocy elektrowni statku. Również w tym przypadku wskazane są badania symulacyjne wpływu załączania silnika na pracę generatorów synchronicznych.

2.3. Ster z rozruchem transformatorowym

Zastosowanie transformatora przy rozruchu silnika indukcyjnego (rys. 3) umożliwia znaczne ograniczenie prądu rozruchowego silnika indukcyjnego. Należy dobrać wartości napięcia zasilania silnika i ich przełączanie w czasie rozruchu zapewniające pracę elektrowni statku w zadanym przedziale prądów generatora synchronicznego. Prowadzone badania symulacyjne umożliwiają dobór wartości napięć zasilania silnika, czasów pracy silnika przy danym napięciu i sprawdzenie maksymalnych wartości prądu rozruchowego.



Rys. 2. Schemat zespołu steru strumieniowego rozruchem przez przełącznik gwiazda-trójkąt

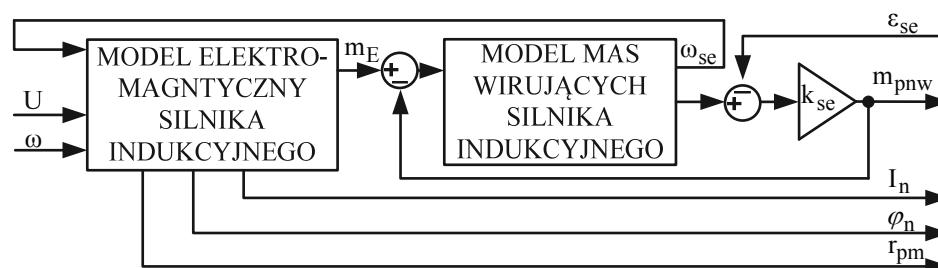


Rys.3. Schemat zespołu steru strumieniowego rozruchem przez autotransformator

3. MODELE MATEMATYCZNE BADANYCH PODZESPOŁÓW

3.1. Model matematyczny silnika indukcyjnego

Przyjęto typowy model matematyczny silnika indukcyjnego [4, 8], opisany zależnościami (1–14), uzyskanymi w wyniku przekształcenia równań opisujących obwody silnika. Strukturę modelu przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Struktura modelu silnika indukcyjnego

Równania opisujące model silnika indukcyjnego:

$$Z_1 = R_1 + jX_1, \quad (1)$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2, \quad (2)$$

gdzie: Z_1 – impedancja zespolona obwodów stojana, Z_2 – impedancja zespolona obwodów wirnika, s – poślizg wirnika, R_1 – rezystancja stojana, X_1 – reaktancja stojana, R_2 – rezystancja obwodu klatki, X_2 – reaktancja sprężenia wirnika i obwodu klatki.

Impedancję zespoloną zastępczą połączenia równoległego reaktancji X_M i impedancji Z_2 wyraża równanie:

$$Z_{AB} = \frac{jX_M \cdot Z_2}{jX_M + Z_2}, \quad (3)$$

gdzie: X_M – reaktancja rozproszenia.

Impedancję zespoloną zastępczą Z_z wyraża równanie:

$$Z_z = Z_1 + Z_{AB}, \quad (4)$$

Zespoloną wartość prądu silnika I_1 wyraża równanie:

$$I_1 = \frac{U}{Z_z}, \quad (5)$$

gdzie: U – amplituda napięcia zasilania.

Prąd klatki wirnika I_2 wyznaczamy z zależności:

$$U_1 = I_1 \cdot Z_1, \quad (6)$$

$$U_{AB} = U - U_1, \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{Z_2}, \quad (8)$$

Moment obrotowy generowany przez silnik indukcyjny możemy wyrazić zależnością:

$$m_E = \frac{R_2}{s} \cdot I_2^2, \quad (9)$$

gdzie: m_E – moment obrotowy generowany przez silnik indukcyjny.

Poślizg wirnika s wyznaczamy ze wzoru:

$$s = 1 - p_n \frac{\omega_{se}}{\omega}, \quad (10)$$

gdzie: p_n – liczba par biegunów stojana silnika, ω_{se} – prędkość kątowna wirnika silnika, ω – pulsacja prądu przemiennego.

Liniowy opis części mechanicznej silnika indukcyjnego. Wartość przenieszonego momentu obrotowego przez wał silnika określa równanie:

$$m_{pnw} = k_{se}(\varepsilon_{se} - \varepsilon_{ws}), \quad (11)$$

gdzie: m_{pnw} – moment przenoszony na wał, k_{se} – współczynnik sprężystości skrętnej wału silnika, ε_{ws} – droga kątowna z wału odbiornika, ε_{se} – droga kątowna wału wirnika.

Drogę kątowną wału silnika można wyrazić następująco:

$$\varepsilon_{se} = \int_0^t \omega_{se}(t) dt, \quad (12)$$

gdzie: ω_{se} – prędkość kątowna wirnika silnika.

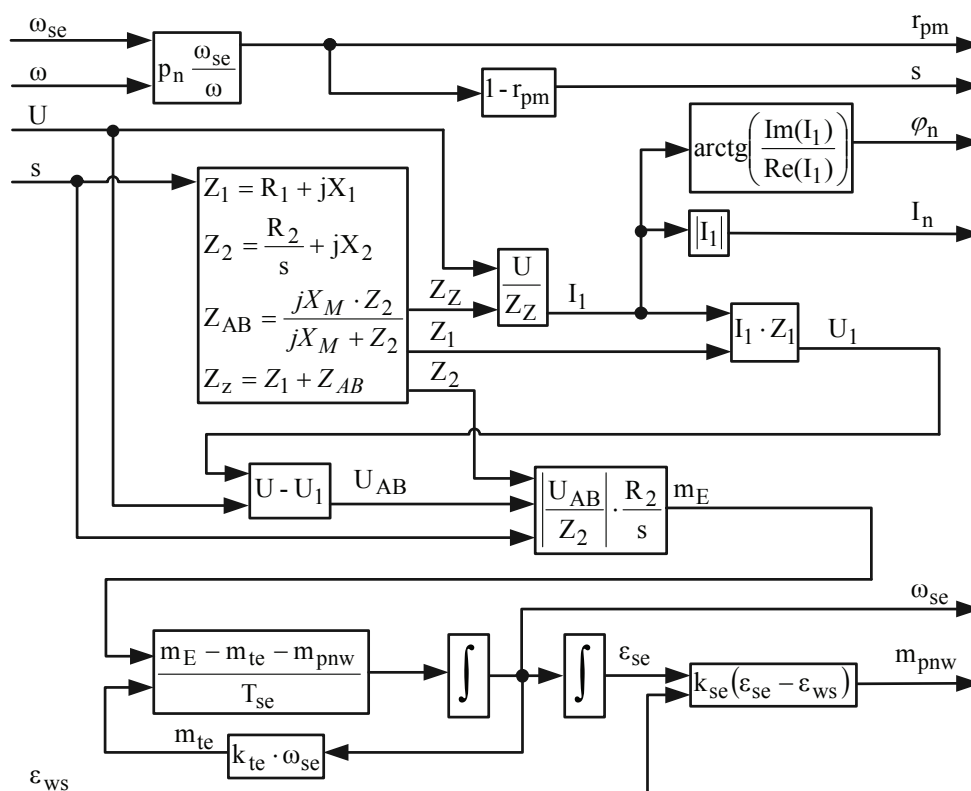
Dynamikę mas wirujących silnika indukcyjnego opisują zależności:

$$T_{se} \frac{d\omega_{es}}{dt} = m_E - m_{te} - m_{pnw}, \quad (13)$$

$$m_{te} = k_{te} \cdot \omega_{se}, \quad (14)$$

gdzie: T_{se} – stała rozbiegu mas wirujących silnika indukcyjnego, m_{te} – moment tarcia wirnika silnika, k_{te} – współczynnik wzmocnienia momentu tarcia wirnika.

Na podstawie opisów matematycznych (1–14) opracowano model matematyczny (rys. 5).

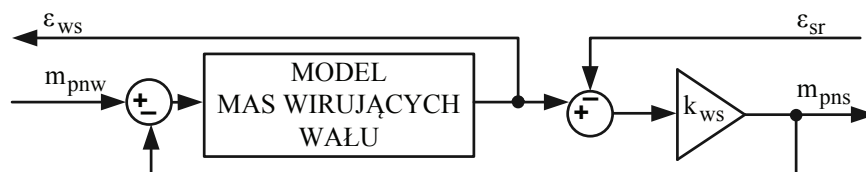


Rys. 5. Model matematyczny silnika indukcyjnego

Korzystając ze środowiska symulacyjnego MATLAB/Simulink zredagowano model silnika indukcyjnego (rys. 5). Przyjęto wartości parametrów: $T_{se}=2$, $p_n=3$, $k_{se}=1 \cdot 10^7$, $k_{te}=0,02$, pozostałe parametry dobrano przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego (pkt 4).

3.2. Model matematyczny wału śrubowego

Opracowano liniowy model matematyczny wału śrubowego [4], jako element przekazujący energię mechaniczną ze źródła energii do śruby (rys. 6).



Rys. 6. Struktura modelu wału śrubowego

Wartość przenieszonego momentu obrotowego przez wał śrubowy określa równanie:

$$m_{pns} = k_{ws} (\epsilon_{ws} - \epsilon_{sr}), \quad (15)$$

gdzie: m_{pns} – moment przenoszony na śrubę, k_{ws} – współczynnik sprężystości skrętnej wału, ε_{ws} – droga kąтова wału śrubowego, ε_{sr} – droga kąтова śruby.

Drogę kątową wału śrubowego można wyrazić następująco:

$$\varepsilon_{ws} = \int_0^t \omega_w(t) dt, \tag{16}$$

gdzie: ω_w – prędkość kąтова wału śrubowego.

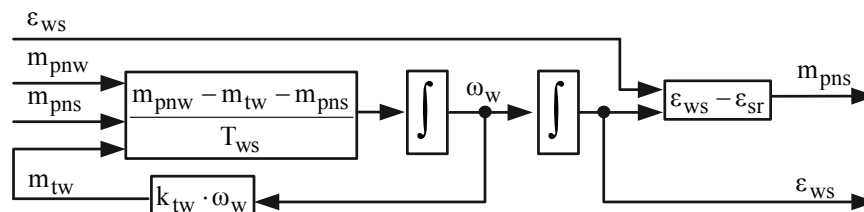
Dynamikę mas wirujących wału śrubowego opisują zależności:

$$T_{ws} \frac{d\omega_w}{dt} = m_{pnw} - m_{tw} - m_{pns}, \tag{17}$$

$$m_{tw} = k_{tw} \cdot \omega_w, \tag{18}$$

gdzie: T_{ws} – stała rozbiegu mas wirujących wału śrubowego, m_{tw} – moment tarcia wału śrubowego, m_{pnw} – moment przenoszony przez wał śrubowy, k_{tw} – współczynnik wzmocnienia momentu tarcia wału śrubowego.

Na podstawie równań (15–18) opracowano model matematyczny wału śrubowego (rys. 7).

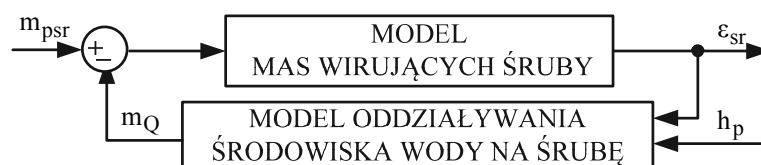


Rys. 7. Liniowy model matematyczny wału śrubowego

Korzystając ze środowiska symulacyjnego MATLAB/Simulink zredagowano model wału śrubowego (rys. 11). Przyjęto wartości parametrów: $k_{ws}=8 \cdot 10^6$, $T_{ws}=0,001$, $k_{tw}=0,001$.

3.3. Model matematyczny śruby nastawnej

Przyjęto model matematyczny śruby o zmiennym skoku [4]. Model opisuje nieliniowy odbiornik energii mechanicznej (rys. 8), w którym moment oporowy m_Q pracującej śruby jest funkcją: nastawionego skoku śruby, prędkości kąkowej wału śrubowego i prędkości liniowej statku względem wody.



Rys. 8 – Struktura modelu śruby o zmiennym skoku

W modelu śruby (rys. 9) dynamikę opisano modelem mas wirujących i oddziaływaniem środowiska na śrubę. Wejściami modelu są: m_{psr} - moment przekazywany do śruby, h_p - skok śruby, V_{statku} – prędkość statku, a wyjściem: ε_{sr} - droga kąтова wału śruby.

Ruch śruby wraz z wałem opisuje równanie:

$$T_Q \frac{d\omega_Q}{dt} = m_{psr} - m_Q, \tag{19}$$

gdzie: T_Q - stała rozbiegu mas wirujących wału śrubowego, ω_Q - prędkość kąтова wału śrubowego, m_Q - moment oporowy śruby.

Drogę kątową wału śruby można wyrazić następująco:

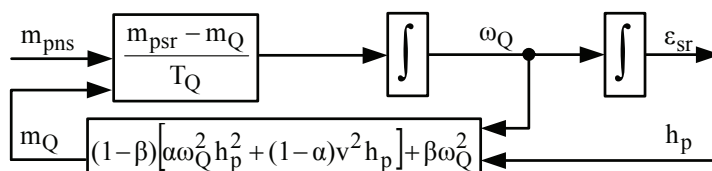
$$\varepsilon_{sr} = \int_0^t \omega_Q(t) dt . \quad (20)$$

Do celów badań symulacyjnych, przy założeniu, że prędkość kątowna wału śrubowego jest zawarta w przedziale $0,5\omega_{zn} < \omega < \omega_{zn}$ dodatnich prędkości statku, moment oporowy śruby o skoku nastawnym opisuje zależność:

$$m_Q = (1 - \beta) \left[\alpha \omega_Q^2 h_p^2 + (1 - \alpha) v^2 h_p \right] + \beta \omega_Q^2, \quad (21)$$

gdzie: α, β - współczynniki stałe.

Na podstawie równań (19–21) opracowano model matematyczny śruby (rys. 9).



Rys. 9. Nieliniowy model matematyczny śruby o zmiennym skoku

Korzystając ze środowiska symulacyjnego MATLAB/Simulink zredagowano model śruby o skoku nastawnym (rys. 11). Przyjęto wartości parametrów: $\alpha=0.8$, $\beta=0.15$, $V_{statku}=0$, $T_Q=0.09$.

4. DOBÓR PARAMETRÓW PRZEZ ALGORYTM GENETYCZNY

Modele matematyczne opisują rzeczywiste obiekty przy pomocy odpowiednich operatorów matematycznych oraz parametrów. Odzworowanie przez model działania rzeczywistego elementu wymaga odpowiednio dobranych parametrów. Nie dla wszystkich elementów (np. silnika indukcyjnego), można przy pomocy obliczeń matematycznych i na podstawie danych katalogowych wyznaczyć parametry modeli. A zatem istnieje potrzeba ich estymacji. Parametry modelu dobierane są tak, aby zapewniały optimum zdefiniowanego kryterium bliskości charakterystyk modelu względem charakterystyk wzorca. W tym celu wykorzystano opracowaną wcześniej metodę doboru parametrów modelu przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych [6]. Działanie modelu oceniano za pomocą kryterium zdefiniowanego wyrażeniem (22).

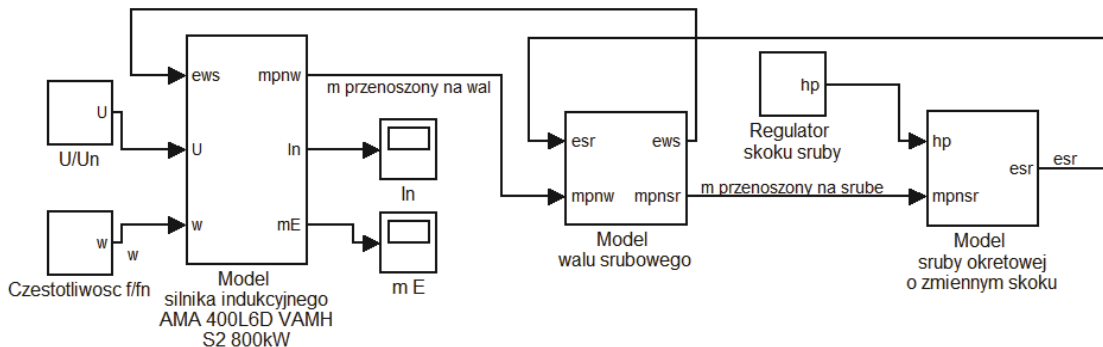
$$\Sigma \left[(m_{pnw} - m_{pnw}(WZ))^2 + (I_n - I_n(WZ))^2 \right] \quad (22)$$

Parametry dobrane przez algorytm genetyczny to: $R1=0,1198$, $X1=0,0090$, $R2=0,0099$, $X2=0,0759$, $XM=1,4195$, adekwatność liczona ze wzoru (22) wynosi 3,19, czas symulacji 210,9 s, liczba generacji 3000. Model silnika indukcyjnego z tymi parametrami odwzorowuje pracę silnika zgodnie z kartą katalogową AMA 4000L6D VAMH S2 800 kW uzyskaną od producenta – firmy ABB [3].

5. BADANIA SYMULACYJNE

Opracowane modele matematyczne zestawiono tworząc strukturę podsystemu steru strumieniowego statku, złożoną z silnika indukcyjnego, wału śrubowego oraz śruby o skoku nastawnym. Badania symulacyjne wykonano w środowisku MATLAB/Simulink. Zredagowany model symulacyjny przedstawia rys. 11. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem procedury numerycznej *ode15s*. W wyniku badań symulacyjnych uzyskano

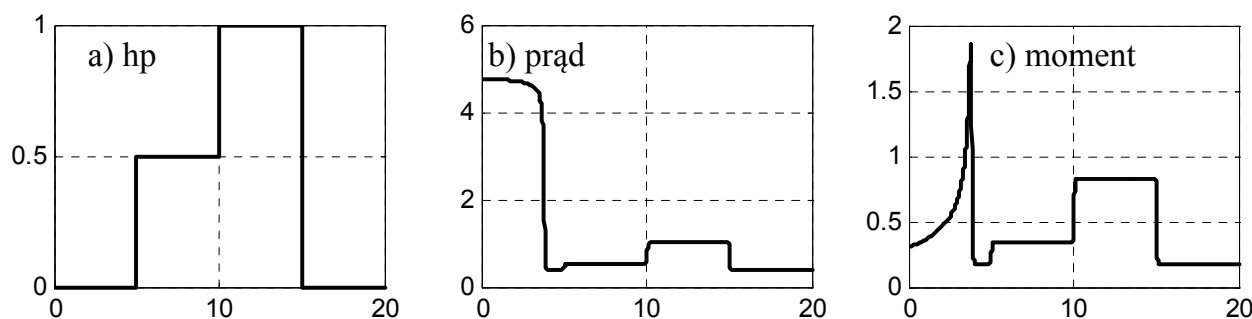
charakterystyki przedstawione na rys. 12–15. Śruba z ustawionym skokiem $h_p=0$ stawia opory, które uwzględniono w modelu śruby i przyjęto jako 15 % obciążenia nominalnego.



Rys. 11. Model matematyczny badanej struktury zredagowany w MATLAB/Simulink

5.1. Badanie rozruchu steru strumieniowego z załączaniem bezpośrednim

Plan badań: w chwili 0s następuje załączenie zasilania $U/U_n=100\%$, 5 s ustawienie skoku śruby $h_p=0,5$ (50 % obciążenia silnika), 10s ustawienie skoku śruby $h_p=1$ (100 % obciążenia silnika), 15 s ustawienie skoku śruby $h_p=0$ (rys. 12).

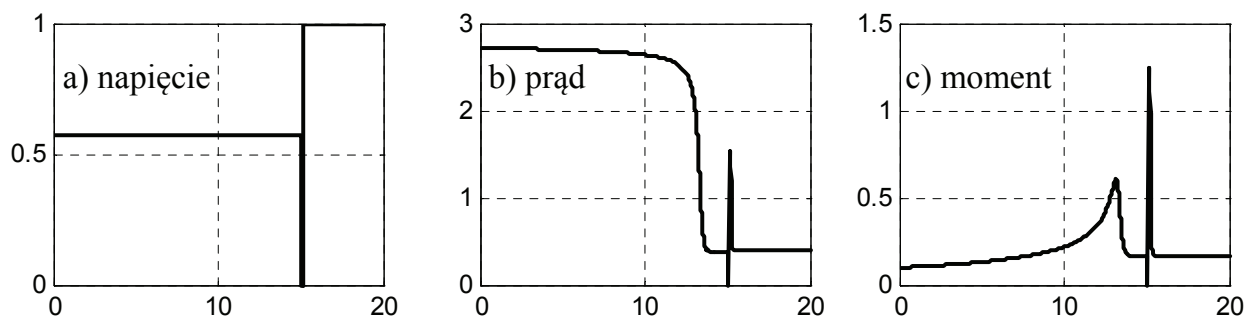


Rys. 12. Symulowane przebiegi skoku śruby, prądu obciążenia, momentu elektromagnetycznego. Oś rzędnych wyrażona w wartościach względnych, oś odciętych w sekundach

Badania symulacyjne wykazują znaczne przekroczenie prądu znamionowego silnika indukcyjnego w chwili rozruchu – około 5 razy (rys. 12b). Wskazane jest badanie wpływu załączania silnika na pracę całej elektrowni statku.

5.2. Badanie rozruchu steru z załączaniem do sieci przełącznikiem gwiazda - trójkąt

Plan badań: w chwili 0 s załączenie zasilania $U/U_n=57\%$ (odpowiednik obciążenia dla połączenia w gwiazdę), 15 s – załączenie zasilania $U/U_n=100\%$ (praca w połączeniu w trójkąt), z uwagi na zastosowanie przełącznika gwiazda – trójkąt zasymulowano przerwę w zasilaniu 0,2 s w czasie przełączania (rys. 13).

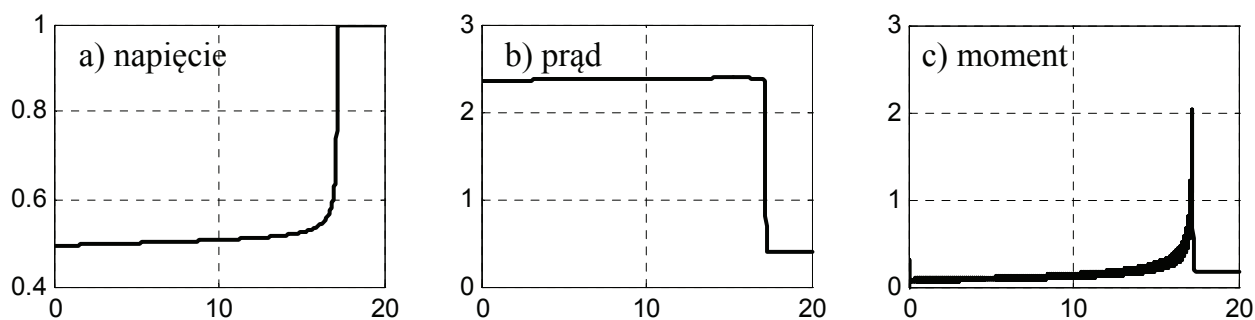


Rys. 13. Symulowane przebiegi napięcia, prądu obciążenia, momentu elektromagnetycznego. Oś rzędnych wyrażona w wartościach względnych, oś odciętych w sekundach

W chwili rozruchu następuje prawie 3-krotne przekroczenie prądu znamionowego silnika indukcyjnego. Czas trwania rozruchu wydłużył się blisko 3-krotnie w porównaniu do rozruchu bezpośredniego silnika. Podczas przełączania z gwiazdy na trójkąt występują znaczne wartości udarowe prądu i momentu. Również w tym przypadku wskazane jest badanie wpływu rozruchu silnika na pracę całej elektrowni statku.

5.3. Badanie rozruchu steru strumieniowego z załączaniem poprzez autotransformator

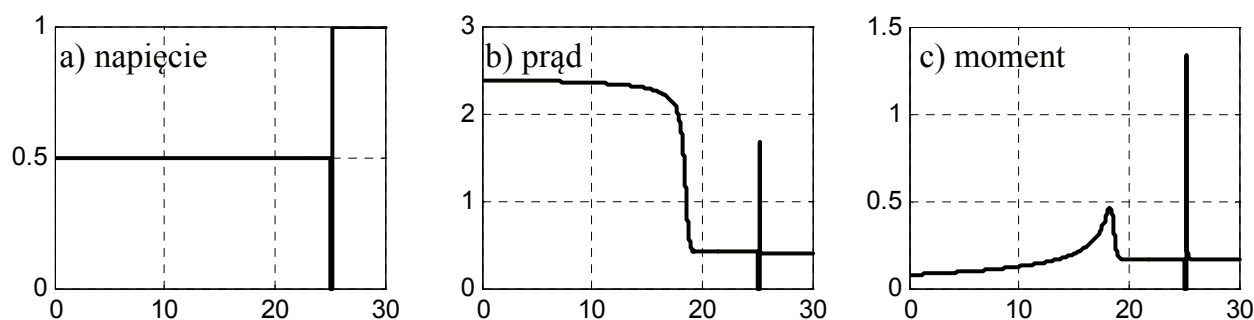
Do badań przyjęto założenia zgodne z zaleceniami towarzystw klasyfikacyjnych, że prąd rozruchowy nie powinien przekroczyć o 50 % wartości nominalnej generatora oraz czas tego przeciążenia nie powinien przekraczać 18 s. Aby dobrać napięcia autotransformatora zasymulowano rozruch silnika z regulatorem PI stałoprądowym. Sterowanie rozruchem przy wykorzystaniu regulatora stałoprądowego daje możliwość regulacji maksymalnej wartości prądu rozruchowego. Jednak przy zbyt niskim napięciu zasilania moment jest tak mały, że ster strumieniowy rusza bardzo wolno. Czyli sama regulacja napięcia przy stałej wartości maksymalnej prądu jest niewystarczająca. Należy dobrać prąd rozruchowy, aby dość szybko pokonać opory silnika, wału oraz śruby. Napięcie regulowane jest przez regulator PI, tak, aby czas przeciążenia nie przekraczał 18 s, a prąd rozruchowy był możliwie niski (rys. 14).



Rys. 14. Symulowane przebiegi napięcia, prądu obciążenia, momentu elektromagnetycznego. Oś rzędnych wyrażona w wartościach względnych, oś odciętych w sekundach

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych (rys. 14) zaobserwowano, że przy $U/U_n = 50\%$ prąd rozruchowy przekracza 2,4 razy prąd nominalny, a czas rozruchu wynosi ok. 17 s.

Obniżanie napięcia zasilania podawanego poprzez autotransformator powoduje obniżanie prądu rozruchowego (rys. 13a,b, 14a,b). Stopień obniżenia napięcia możemy dobrać dowolnie. W rzeczywistości obniżanie napięcia rozruchowego powoduje również wydłużenie czasu rozruchu co jest dodatkowo spotęgowane oporem (ok. 15 %) stawianym przez śrubę, a przepisy towarzystw klasyfikacyjnych ograniczają czas takiego przeciążenia. Mając to na względzie przyjęto plan badań: w chwili 0s następuje załączenie zasilania $U/U_n=50\%$, 25 s – załączenie zasilania $U/U_n=100\%$. W trakcie przełączania symulowano przerwę w zasilaniu 0,2 s.



Rys. 15. Symulowane przebiegi napięcia, prądu obciążenia, momentu elektromagnetycznego. Oś rzędnych wyrażona w wartościach względnych, oś odciętych w sekundach

W chwili rozruchu następuje prawie 2,4-krotne przekroczenie prądu znamionowego silnika indukcyjnego (rys. 15b). Czas trwania rozruchu wydłużył się blisko 4-krotnie w porównaniu do rozruchu bezpośredniego silnika. Podczas przełączania między odczepami autotransformatora występują znaczne wartości udarowe prądu i momentu. Również w tym przypadku wskazane jest badanie wpływu rozruchu silnika na pracę całej elektrowni statku.

6. WNIOSKI

Prowadzenie badań symulacyjnych ułatwia obserwację procesów zachodzących podczas rozruchu i obciążania podsystemu steru strumieniowego statku. Można określić maksymalne wartości prądów silnika i zbadać wpływ rozruchu silnika na pracę elektrowni statku. Przy rozruchu transformatorowym istnieje możliwość doboru wartości napięć zasilających i chwil przełączania napięcia zasilania przy zapewnieniu granicznych wartości prądu silnika.

Przeprowadzone badania wykazują, że zmniejszanie prądu rozruchowego silnika indukcyjnego prowadzi do wydłużenia czasu rozruchu. Przy rozruchu prądem znamionowym czas rozruchu znacznie się wydłuża i osiąga wartość XXs, co jest wartością zbyt dużą. Należy znaleźć kompromis pomiędzy czasem rozruchu, a wartością prądu rozruchowego. Na podstawie badań symulacyjnych można również wnioskować, jaka moc elektrowni powinna być do dyspozycji w chwili rozruchu silnika steru strumieniowego, jeżeli chcemy zachować przepisy towarzystwa klasyfikacyjnego dotyczące systemu elektroenergetycznego statku.

Prezentowane prace dotyczą jedynie wycinka zagadnień podejmowanych przez autorów związanych z komputerowo wspomaganym projektowaniem układów automatyki systemów energetycznych statku [4, 5, 6].

BIBLIOGRAFIA

1. ABB Zamech: Ster strumieniowy z rozruchem autotransformatorowym TYP375TV-ULSTEIN, dokumentacja OS-2980-814V.1, 1995.
2. ABB Zamech: Ster strumieniowy z rozruchem gwiazda-trójkąt, dokumentacja F250Z2, 1992.
3. ABB Zamech: Silnik indukcyjny AMA 400L6D, dokumentacja 4902HD200, 2000.
4. Arendt R.: Hierarchiczne modele hybrydowe systemu energetycznego statku o definiowanej strukturze. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006.
5. Arendt R., Kopczyński A.: Zastosowanie modeli matematycznych przy projektowaniu podsystemów energetycznych statków. Automation, Warszawa 2008.
6. Arendt R., Kopczyński A., Wojtczak M.: The choice of parameters of induction motor model using a genetic algorithm. MMAR, Międzyzdroje, 2004.
7. Galbas J. Krajczyński Z., Lisowski J.: Okrętowe stery strumieniowe. Gdańsk: Wydawnictwo Morskie, 1986.
8. Zajczyk R.: Modele matematyczne systemu elektroenergetycznego do badania elektromechanicznych stanów nieustalonych i procesów regulacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2003.
9. M. S. Chislett, Editor: Marine simulation and ship manoeuvrability, Rotterdam, 1996.