

Nr 98/2017, 27–34  
ISSN 1644-1818  
e-ISSN 2451-2486

## KONCEPCJA DIAGNOSTYKI ELEKTRYCZNEGO PĘDNIKA OKRĘTOWEGO

### IDEA OF DIAGNOSTIC FOR SHIP ELECTRICAL THRUSTERS

**Maciej Dęsoł**

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81–87, 81-581 Gdynia, Wydział Elektryczny,  
Studium Doktoranckie, e-mail: maciej.desol@gmail.com

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia możliwości implementacji algorytmów diagnostyki elektrycznego pędnika okrętowego do systemów monitoringu i sterowania siłownią okrętową. Stany awaryjne wynikające z eksploatacji pędników okrętowych wraz z ich odpowiednią interpretacją mają zapewnić wyższy poziom bezpieczeństwa dla załogi oraz zmniejszyć awaryjność danych układów. Dokładna analiza stanów ma zostać zoptymalizowana za pomocą bazy reguł systemu eksperckiego wraz z metodami sztucznej inteligencji.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, bazy reguł, system ekspercki, pędnik okrętowy.

**Abstract:** The article presents the possibility of implementation of algorithms for diagnostic electric azimuth thruster ship to ship's monitoring and control systems. States of emergency arising from the operation of thrusters, along with right interpretation provide higher level of safety for the crew and reduce the failure rate in systems. A thorough analysis should be accelerated and expanded with help of expert system rule base, together with the methods of artificial intelligence.

**Keywords:** diagnostics, rule base, expert system, thruster.

#### 1. WSTĘP

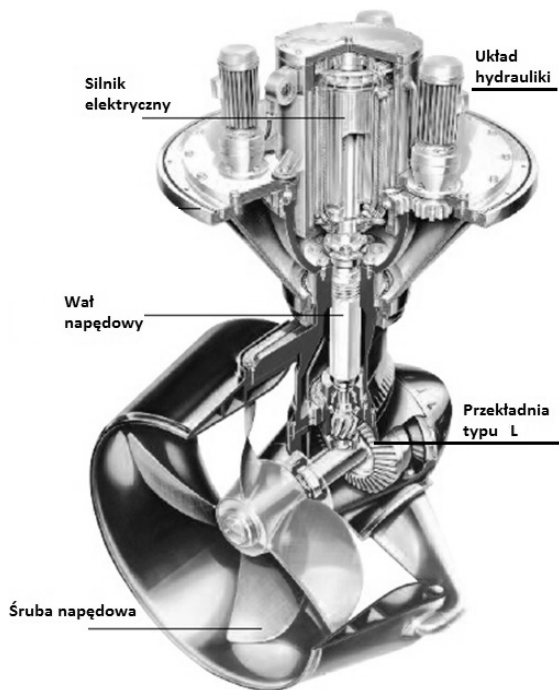
Czas eksploatacji pędników elektrycznych szacowany jest na około 20 lat. Przeglądy oraz remonty okresowe wyznaczone przez towarzystwa klasyfikacyjne na 5 lat nie są wystarczające do zachowania 100% sprawności tych urządzeń. Wewnętrzne wymagania armatorów wyznaczają okresy na dokonywanie przeglądów podczas eksploatacji, które nie dają pełnego przekroju charakterystyk zużycia elektrycznych oraz elektronicznych układów pędnika okrętowego [Rutkowski 2013]. Obecnie dużą trudnością jest stworzenie pełnego modelu układów automatyki dla pędników okrętowych, który charakteryzowałby ich wszystkie stany [Śmierzchalski 2004].

Już istniejące w sposób niepełny przedstawiają wpływ uszkodzeń poszczególnych podzespołów bezpośrednio na cały układ. Sygnały pobierane z torów pomiarowych, opisujących pracę pędników, służą jedynie do określenia aktualnych stanów pracy. Brak analizy wcześniejszych wartości oraz brak metod określających ich gradację sprawia, że nie można dokonać dokładnych opisów.

Diagnostyka uszkodzeń tych układów powinna opierać się metodach bazujących na systemach eksperckich, sztucznych sieciach neuronowych oraz logiki rozmytej [Korbicz i in. 2004]. Zbudowanie bazy eksperckiej dla pędników okrętowych powinno okazać się najlepszym rozwiązaniem.

## 2. ANALIZA BUDOWY UKŁADU ELEKTRYCZNEGO PĘDNIKA OKRĘTOWEGO

Układ elektrycznego pędnika okrętowego zilustrowany na rysunku 1 przedstawia charakterystyczne dla niego elementy konstrukcji. Silnik elektryczny zasilany z elektroenergetycznej sieci statkowej przekazuje moment obrotowy na śrubę za pomocą przekładni typu L. Na kopule pędnika zainstalowane są pompy hydrauliczne, służące do uzyskania określonego kąta obrotu wokół własnej osi.



**Rys. 1.** Elektryczny pędnik azymutalny [Schottel]

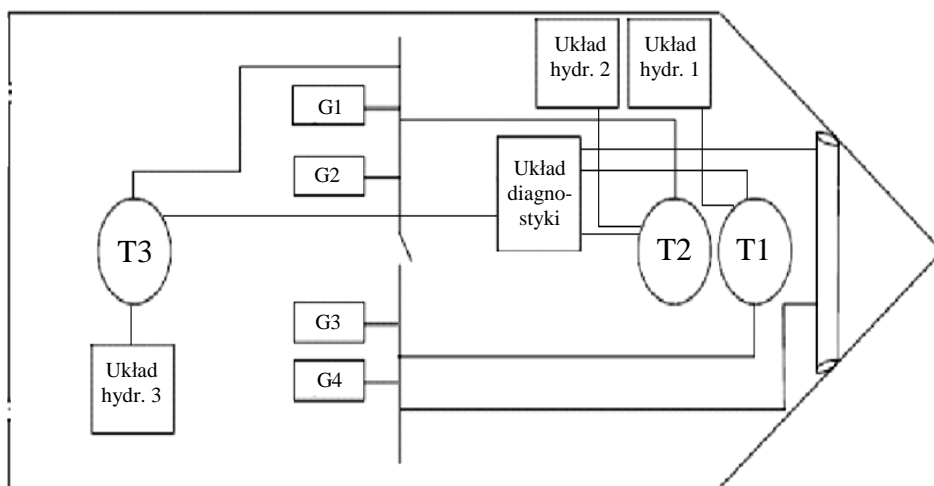
**Fig. 1.** Electric azimuth thruster [Schottel]

W układach diagnostyki oprócz kontroli poprawności pracy układu sterowania pracą przeprowadza się również analizę struktur mechanicznych. W zainstalowanej przekładni typu L oprócz kontroli wibracji czy temperatury, nowoczesne systemy automatyki dokonują bieżącej kontroli jakości oleju.

Z racji bardzo rzadkiej możliwości dokonania przeglądów technicznych układy diagnostyki pędników okrętowych analizują nie tylko pracę części, z których zbudowany jest pędnik, ale także pozostałe systemy, które się do niego zaliczają.

Konfiguracja całego układu zaimplementowanego na statku, wyposażonym w sieć elektroenergetyczną z 4 generatorami prądowymi oraz 3 pędnikami, została przedstawiona na rysunku 2. Układ diagnostyki oprócz nadzoru nad pracą pędników dokonuje również analizy pracy układu zasilania. Na przedstawionym przykładzie silnik elektryczny pędnika zasilony jest bezpośrednio z sieci statkowej. Jego rozruch odbywa się za pomocą układu *soft start*. Kontrola zarządzania elektrownią statkową pozwala układowi diagnostycznemu na zachowanie ciągłości pracy pędników w przypadku nagłego zaniku napięcia w danej sekcji głównej tablicy rozdzielczej. Analiza wszystkich możliwości awarii wraz z oceną jej skutków dokonywana jest w procesie testów FMEA (ang. *Failure Mode and Effect Analysis*) [Rutkowski 2013].

Silnik ma stałą prędkość obrotową, a moc pędnika regulowana jest za pomocą nastawnych płatów na śrubie. Zadane wychylenie śruby osiągane jest za pomocą układu hydraulicznego. Jak pokazano na poniższym przykładzie, każdy z pędników posiada swój niezależny układ hydrauliczny.



G1, G2, G3, G4 – generatory prądowe,  
T1, T2, T3 – elektryczne pędniki okrętowe.

**Rys. 2.** Projekt statku z trzema pędnikami elektrycznymi

**Fig. 2.** Ship design with three electric thrusters

### 3. SYSTEMY EKSPERCKIE W DIAGOSTYCE PĘDNIKÓW OKRĘTOWYCH

System ekspercki [Cholewa 2002; Ligeża 2002; Mulawka 1996] oparty na wiedzy eksperta, powinien znaleźć zastosowanie na statkach jako układ do detekcji i lokalizacji uszkodzeń. Funkcja doradcza daje operatorowi wiedzę realną, służącą pomocą w momentach krytycznych dla pracy danego układu.

Systemy eksperckie nie bazują na symulowaniu awarii. Na bieżąco po otrzymaniu danych z torów pomiarowych oraz innych sygnałów dokonywana jest ich analiza. Dodatkową zaletą tego rozwiązania jest możliwość wywnioskowania, która umożliwi systemowi podjęcie najbezpieczniejszej decyzji bez udziału operatora systemu.

W systemach diagnostyki pędników okrętowych ważną zaletą zastosowania systemów eksperckich jest funkcja wnioskowania w przód. Na podstawie otrzymanych informacji istnieje możliwość wygenerowania kilkunastu wniosków.

Skonfigurowanie baz reguł w systemach eksperckich [Cholewa 2002; Mulawka 1996] jest oparte na określeniu dokładnego modelu działania pracy pędnika okrętowego.

Systemy automatyki sterujące pędnikiem składają się z kilku podukładów współpracujących ze sobą. Wystąpienie awarii w każdym z nich może spowodować uszkodzenie w innym podsystemie. Dodatkowo, tworząc reguły, należy uwzględniać możliwość łączenia symptomów z różnych grup. Postać reguł przyjmuje postać określoną wzorem 1.

W systemy eksperckie należy włączyć również bazę danych, która opisuje konkretne zachowania systemu w przypadku wystąpienia danych awarii, przedstawionych zależnością 2.

$$\textit{If} \text{ symptom 1 } \textit{and} \text{ symptom 2 } \textit{then} \text{ awaria 1} \quad (1)$$

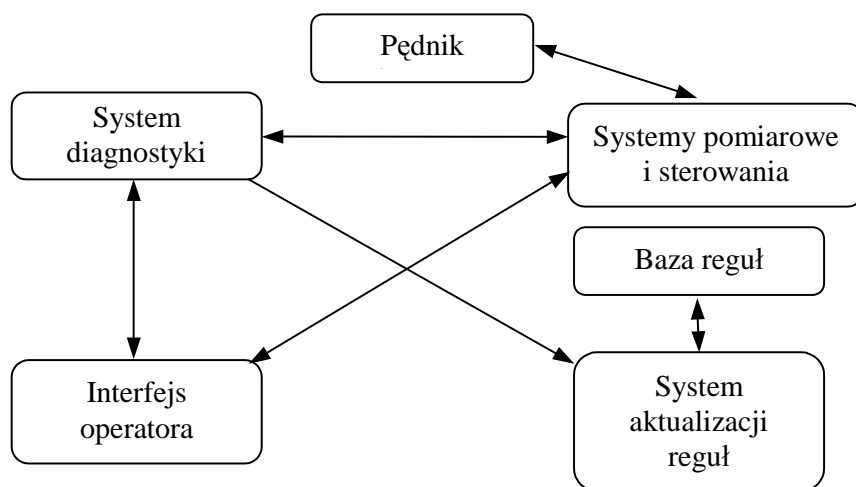
$$\textit{If} \text{ awaria 1 } \textit{and} \text{ awaria 2 } \textit{then} \text{ reakcja 1} \quad (2)$$

W układach diagnostycznych implementowanych na statkach, jak pokazują powyższe przykłady, te określone symptomy mogą skutkować nie tylko przekazaniem operatorowi stanu alarmowego, lecz także mogą doprowadzić do wykonania pewnych operacji w układzie automatyki.

Celem takiego rozwiązania jest zapewnienie większego poziomu bezpieczeństwa. Wielokrotnie operator przy nagromadzeniu dużej liczby stanów alarmowych nie może wystarczająco szybko podjąć decyzji zapobiegającej długotrwałemu uszkodzeniu urządzenia.

#### 4. TWORZENIE REGUŁ DLA SYSTEMÓW EKSPERCKICH W UKŁADACH DIAGNOSTYKI PĘDNIKA OKRĘTOWEGO

Na rysunku 3 przedstawiono model blokowy układu diagnostyki z funkcją systemu eksperckiego, która stanowi wbudowany blok reguł. Dodatkową opcją, bardzo ważną w tym rodzaju układów, jest system aktualizacji baz reguł.



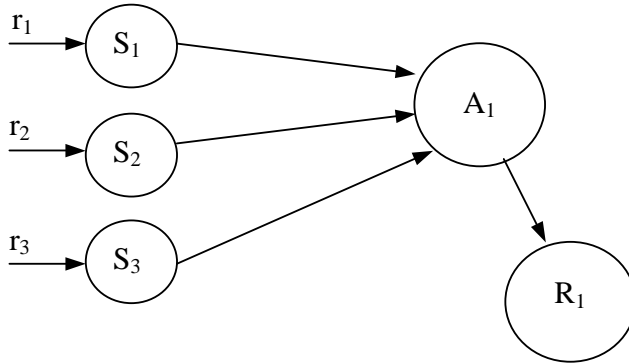
**Rys. 3.** Schemat ideowy układu diagnostyki z systemem eksperckim dla pędnika okrętowego

**Fig. 3.** Schematic diagram of diagnostics model for azimuth thruster with expert function

Tworzenie baz reguł jest etapem stopniowym [Cholewa 2002]. W celu poznania wszystkich reguł wymagane jest przeanalizowanie wystąpienia wszystkich możliwych symptomów awarii. System aktualizacji reguł ma za zadanie dokonywać zmian w istniejących już regułach. Może odbywać się to w sposób zadany przez operatora poprzez zmianę wartości alarmowych.

Drugim sposobem jest dodanie do tego modelu sztucznych sieci neuronowych [Korbicz i in. 2004]. Niewątpliwą zaletą jest możliwość nauczania i uaktualniania w czasie rzeczywistym istniejącej już bazy reguł. Określenie wszystkich reguł dla systemu pędnika okrętowego wymaga powiązania wielu niewspółpracujących ze sobą w stopniu bezpośrednim systemów. Części mechaniczne, jak łożyska czy przekładnie, w sposób bezpośredni mogą nie mieć powiązań z takimi urządzeniami, jak silnik elektryczny czy czujniki prędkości obrotowej pędnika okrętowego. Do określenia wszystkich powiązań służą grafy diagnostyczne wiążące ze sobą różnego rodzaju symptomy oraz rodzaje awarii. Na podstawie grafów określa się bazy reguł.

Na rysunku 4 przedstawiono opracowany graf diagnostyczny.



- $r_1, r_2, r_3$  – residua wygenerowane przez system pomiarowy,
- $S_1$  – symptom 1, zmniejszenie prędkości obrotowej pędnika okrętowego,
- $S_2$  – symptom 2, zwiększenie temperatury łożyska przekładni pędnika okrętowego,
- $S_3$  – symptom 3, zwiększenie prądu uzwojeń silnika elektrycznego zasilającego pędnik okrętowy,
- $A_1$  – awaria 1, zatarte łożysko numer 1 na przekładni,
- $R_1$  – reakcja 1, zatrzymanie pędnika okrętowego.

**Rys. 4.** Graf diagnostyczny przedstawiający powiązania symptomów dla danej awarii pędnika okrętowego

**Fig. 4.** *Diagnostics graph showing connections between symptoms for fault findings*

Przedstawione symptomy, określone za pomocą residuów, pochodzą z trzech różnych podsystemów. Residua obliczane są w systemie monitoringu pracy pędnika okrętowego z użyciem porównania z modelami analitycznymi. Symptomy przedstawione na rysunku 4 wyznaczane są za pomocą wartości alarmowych odpowiednio zaimplementowanych w systemie kontroli pracy układu pędnika okrętowego. Awarię zdiagnozowaną na podstawie powyższych symptomów stanowi uszkodzenie łożyska na przekładni. Dodatkowo układ diagnostyczny zapobiega większej liczbie awarii w systemie poprzez zatrzymanie pędnika okrętowego.

Dla przedstawionego na rysunku 4 grafu diagnostycznego można określić regułę diagnostyczną, którą implementuje się do bazy danych. W powyższym przykładzie należy zastosować zbiory reguł złożonych. W wyniku powstałych symptomów oprócz określenia awarii, jaka występuje w systemie, wykonane zostanie również działanie czyli zatrzymanie pędnika okrętowego. Określenie zbioru reakcji systemu wiąże się z określeniem gradacji awarii. Reakcja według wytycznych eksperta powinna być opóźniona w czasie, który pozwoli uruchomić dodatkowe systemy bezpieczeństwa.

- If** zmniejszenie prędkości obrotowej  
**and** zwiększenie temperatury łożyska przekładni  
**and** zwiększenie prądu uzwojeń silnika elektrycznego (3)  
**than** zatarte łożysko przekładni pędnika okrętowego

Inny przykład zbioru reguł pochodzących z różnych podsystemów w pędniku okrętowym został przedstawiony w regule 4 – symptomy pochodzące z toru pomiarowego układu kąta obrotu pędnika oraz układu hydrauliki pędnika okrętowego. Skutkiem interpretacji otrzymanych symptomów jest wyznaczenie awarii, obejmującej uszkodzenie pompy układu hydraulicznego pędnika okrętowego.

- If** błędny kąt obrotu pędnika  
**and** niskie ciśnienie za pompą hydrauliczną  
**and** duży prąd silnika elektrycznego pompy hydraulicznej (4)  
**than** uszkodzona pompa hydrauliczna – uruchomienie zapasowej pompy hydraulicznej

Dodatkową reakcją w przedstawionej regule 4 jest uruchomienie zapasowej pompy hydraulicznej. W tym przypadku pomiar ciśnienia stanowi symptom wykorzystywany również w innych regułach. Podstawową różnicą jest zmiana wartości alarmowej dla poszczególnych reguł. Dla niektórych symptomów przyjmowany jest system zero-jedynkowy. Jednak dla bardziej skomplikowanych torów pomiarowych, wykorzystujących sygnały analogowe, wartość alarmowa dopasowywana jest dla konkretnej awarii w układzie.

## 5. PODSUMOWANIE

Implementacja systemów diagnostycznych w układach monitoringu i sterowania pędnikiem okrętowym stanowi istotny cel stawiany przez wielu armatorów firmom produkującym pędniki okrętowe. Najważniejszą przyczyną takiego wymogu jest zwiększenie bezpieczeństwa. Algorytm diagnostyki obejmuje sygnały diagnostyczne generujące residua, które pochodzą z wszystkich podsystemów elektrycznego pędnika okrętowego.

Przedstawione w powyższym artykule bazy reguł pokazują złożoność połączeń między poszczególnymi symptomami. Każdy z pędników okrętowych posiada około 100 różnego rodzaju torów pomiarowych. W sumie z powstałych symptomów można wygenerować około 300 awarii dla jednego pędnika okrętowego. Dodatkowo opcja uczenia i aktualizacji bazy reguł powinna umożliwić usprawnić działanie systemu diagnostycznego poprzez eliminacje błędnych.

## LITERATURA

- Cholewa, W., 2002, *Systemy doradcze w diagnostyce technicznej*, w: Korbicz, J., Kościelny, J.M., Kowalczyk, Z., Cholewa, W., (red.), *Diagnostyka procesów*, WNT, Warszawa.
- Korbicz, J., Kościelny, J., Kowalczyk, Z., Cholewa, W., 2004, *Fault Diagnosis. Models, Artificial Intelligence, Applications*, Springer-Verlag, Berlin.
- Ligeża, A., 2002, *Wybrane metody inżynierii wiedzy w diagnostyce systemów*, w: Korbicz, J., Kościelny, J.M., Kowalczyk, Z., Cholewa, W., (red.), *Diagnostyka procesów*, WNT, Warszawa.
- Mulawka, J.J., 1996, *Systemy ekspertowe*, WNT, Warszawa.
- Rutkowski, G., 2013, *Eksploatacja statków dynamicznie pozycjonowanych*, Trademar, Gdynia.
- Schottel, *Materiały informacyjne*, <http://www.schottel.de/marine-propulsion/>.
- Śmierzchalski, R., 2004, *Automatyzacja systemu elektroenergetycznego statku*, Gryf, Gdańsk.