



Politechnika Gdańska
WYDZIAŁ OCEANOTECHNIKI
I OKRĘTOWNICTWA



mgr inż. Janusz Fydrych

**MODEL DIAGNOSTYCZNY ŚRUB O SKOKU NASTAWNYM
DLA POTRZEB STEROWANIA PROCESEM ICH
EKSPLOATACJI**

Praca doktorska

Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler, prof. zw. PG

Gdańsk 2012

Spis treści

Podstawowe pojęcia użyte w pracy	4
Wykaz ważniejszych oznaczeń użytych w prac	8
1. WPROWADZENIE	
1.1 Wstęp	9
1.2 Cel pracy	13
1.3 Hipoteza naukowa	14
1.4 Teza pracy	14
1.5 Zagadnienia podjęte w pracy	14
2. IDENTYFIKACJA PROBLEMU TWORZENIA MODELI DIAGNOSTYCZNYCH ŚRUB O SKOKU NASTAWNYM	
2.1 Uwagi wstępne	17
2.2 Przegląd modeli diagnostycznych śrub nastawnych	18
2.3 Systemy diagnozujące śrub nastawnych	19
2.4 Przydatność praktyczna aktualnie stosowanych systemów diagnozujących śrub nastawnych	22
2.5 Uwagi i wnioski	22
3. ZNACZENIE DIAGNOSTYKI W EKSPLOATACJI ŚRUB NASTAWNYCH	
3.1 Uwagi wstępne	28
3.2 Śruba napędowa o skoku nastawnym jako obiekt sterowania	28
3.3 Stany techniczne śruby nastawnej	31
3.4 Stany eksploatacyjne śruby nastawnej	47
3.5 Proces eksploatacji śruby nastawnej	50
3.6 Zastosowanie diagnostyki do sterowania procesem eksploatacji śruby nastawnej	55
3.7 Uwagi i wnioski	73
4. ŚRUBA NASTAWNA JAKO OBIEKT DIAGNOZOWANIA	
4.1 Uwagi wstępne	75
4.2 Własności techniczno – eksploatacyjne śrub nastawnych	75
4.3 Obciążenie i zużycie śrub nastawnych	81
4.4 Uszkodzenia śrub nastawnych i ich skutki	88
4.5 Możliwości zapobiegania uszkodzeniom śrub nastawnych	95
4.6 Uwagi i wnioski	99
5. ZBIÓR STANÓW TECHNICZNYCH ŚRUBY NASTAWNEJ UWZGLĘDNIONYCH W MODELU DIAGNOSTYCZNYM	
5.1 Uwagi wstępne	100
5.2 Zbiór stanów pełnej zdatności śruby nastawnej	104
5.3 Zbiór stanów częściowej zdatności śruby nastawnej	106
5.4 Zbiór stanów niezdatności śruby nastawnej	110
5.5 Uwagi i wnioski	112

6. ZBIÓR PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH DO IDENTYFIKACJI STANÓW TECHNICZNYCH ŚRUBY NASTAWNEJ	
6.1 Uwagi wstępne	113
6.2 Zbiór parametrów termodynamicznych	113
6.3 Zbiór parametrów wibroakustycznych	114
6.4 Zbiór parametrów charakteryzujących własności fizyko – chemiczne olejów w systemach sterowania skokiem śruby nastawnej	114
6.5 Uwagi i wnioski	115
7. RELACJE DIAGNOSTYCZNE ODWZOROWUJĄCE ZBIÓR STANÓW TECHNICZNYCH ŚRUBY NASTAWNEJ W ZBIÓR PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH	
7.1 Uwagi wstępne	117
7.2 Relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów pełnej zdatności w zbiór parametrów diagnostycznych	117
7.3 Relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów częściowej zdatności w zbiór parametrów diagnostycznych	120
7.4 Relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów niezdatności w zbiór parametrów diagnostycznych	124
7.5 Uwagi i wnioski	130
8. MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA MODELU DIAGNOSTYCZNEGO ŚRUBY NASTAWNEJ W PRAKTYCE EKSPLOATACYJNEJ	
8.1 Uwagi wstępne	132
8.2 Walory opracowanego modelu diagnostycznego śruby nastawnej	133
8.3 Możliwości weryfikacji opracowanego modelu	145
8.4 Propozycje rozbudowy opracowanego modelu	153
8.5 Dalsze kierunki badań	154
8.6 Uwagi i wnioski	155
9. PODSUMOWANIE	157
LITERATURA	160

ZAŁĄCZNIKI

NR 1:

Opis śruby napędowej o skoku nastawnym jako obiekt diagnozowania
Lips B.V Drunen – Holland typ: H.P.C.182

NR 2

Badanie śruby napędowej o skoku nastawnym – wybrane awarie eksploatacyjne

PODSTAWOWE POJĘCIA UŻYTE W PRACY

Armator – osoba uprawiająca żeglugę statkiem własnym lub cudzym.

Bezpieczeństwo – stan, w którym ryzyko odniesienia obrażeń (przez osoby) lub spowodowania szkody zostało ograniczone do akceptowanego poziomu.

Bezpieczeństwo statku – właściwość statku umożliwiająca mu funkcjonowanie (wykonywanie zadań, postój w porcie bądź na redzie, itd.) w określonych warunkach i ustalonym czasie bez zagrożenia (bez pojawienia się niebezpieczeństwa), że zostanie zniszczony i/lub, że nastąpi utrata życia ludzi na nim się znajdujących.

Decyzja – postanowienie o rozpoczęciu, kontynuowaniu, zaniechaniu, zakończeniu działania realizacji procesu eksploatacji.

Diagnoza – informacja, z reguły wielowymiarowa, o stanie przedmiotu diagnozowania, statku (bądź jego urządzeń), jego procesu eksploatacji i warunkach funkcjonowania, potrzebna do podjęcia decyzji. Jest to informacja o domniemanym stanie przedmiotu diagnozowania, uzyskana po zakończeniu wnioskowania diagnostycznego. Diagnoza jest produktem finalnym.

Diagnozowanie – zebranie danych, zrobienie użytku z tych, które mają znaczenie i pominięcie tych, które go nie mają oraz podanie ostatecznego osądu (postawienie diagnozy). Jest to proces oceny stanu technicznego, energetycznego obiektu diagnostyki metodami pośrednimi i bezpośrednimi, które kończy się z chwilą określenia stanu.

Dozorowanie – ciągłe bądź dyskretne generowanie diagnoz chwilowych.

Efektywność – pozytywna cecha działań, w wyniku których uzyskuje się skutek, efekt działania niezależnie, czy był on przewidziany, czy też nie przewidziany, odniesiony do układu, który umożliwił uzyskanie tego efektu.

Efektywność eksploatacyjna – iloraz efektów uzyskanych w ustalonym przedziale czasu trwania określonego stanu obiektu eksploatacji, do nakładów poniesionych na uzyskanie tych efektów.

Eksploatacja – ogół zjawisk, zdarzeń, działań, procesów, jakie zachodzą w czasie istnienia urządzenia od chwili jego wyprodukowania aż do chwili jego kasacji. Jest to użytkowanie bądź obsługiwanie, bądź użytkowanie i obsługiwanie.

Genezowanie – proces określania stanów, które pojawiły się przed opracowaniem aktualnej diagnozy.

Identyfikacja – złożony proces badawczy, w którym na podstawie analizy danych a priori i a posteriori, o badanym istniejącym lub projektowanym obiekcie dokonuje się syntezy modelu, dobrze opisującego obiekt oraz na tyle uproszczonego, aby jego analiza była możliwa do przeprowadzenia i dostarczała informacji o obiekcie.

Jakość – ogół właściwości obiektu, wiążących się z jego zdolnością do zaspokojenia stwierdzonych i przewidywanych potrzeb.

Katastrofa – zdarzenie (wydarzenie) tragiczne w skutkach, w którym ktoś poniósł śmierć bądź znacznie ucierpiał i/lub spowodowało duże (znaczące) straty materialne.

Kontrola – działanie takie, jak zmierzenie, zbadanie, oszacowanie lub sprawdzenie jednej lub kilku właściwości obiektu oraz porównanie wyników z wymogami, w celu stwierdzenia czy w odniesieniu do każdej z tych właściwości osiągnięto zgodność.

Mechanizm obrotu skrzydeł śruby – mechanizm zmiany położenia skrzydeł śruby.

Mechanizm zmiany skoku śruby – mechanizm (lub ramię) umożliwiający działanie mechanizmu obrotu skrzydeł śruby.

Model – dający się przedstawić teoretycznie lub materialnie zrealizować układ, który odzwierciedla przedmiot badania tak, że badanie tego modelu dostarcza nowej informacji o przedmiocie, który jest tym modelem odzwierciedlony.

Nadajnik śruby nastawnej – urządzenie generujące sygnał umożliwiający działanie mechanizmu zmiany skoku śruby.

Niebezpieczeństwo – stan, sytuacja, położenie, zdarzenie w czasoprzestrzeni zagrażające życiu ludzi, zwierząt, roślin i/lub istnieniu obiektów technicznych.

MCR – maksymalne obciążenie silnika głównego podczas jego pracy ciągłej

Obsługiwanie – część ogółu zjawisk, zdarzeń, działań, procesów zachodzących w eksploatacji, które umożliwiają pośrednio lub/i bezpośrednio utrzymanie eksploatowanego urządzenia w stanie zdatności, gotowości.

Polityka eksploatacyjna urządzenia – program wykorzystania urządzenia, na który składa się zbiór dopuszczalnych decyzji.

Polityka obsługiwanego urządzenia – strategia realizacji odnowy urządzenia, która polega na wyborze terminu rozpoczęcia, czasu trwania stanu procesu obsługiwanego i jego intensywność oraz rodzaju i zakresu obsługiwanego. Odnowa urządzenia jest celem działania, a obsługiwanie jest sposobem jej realizacji.

Polityka użytkowania urządzenia – program wykorzystania urządzenia, który polega na wyborze: terminu rozpoczęcia, czasu trwania stanów procesu użytkowania i jego intensywności przebiegu oraz rodzaju obciążeń w czasie użytkowania aktywnego.

Potencjał eksploatacyjny urządzenia – właściwość urządzenia charakteryzująca jego zdolność do wykorzystania zgodnie z potrzebami (generowanymi przez system operacyjny), do których zostało przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania.

Potencjał użytkowy urządzenia – zasób materiałowo – energetyczny urządzenia zapewniający jego zdolność do użytkowania.

Potencjał obsługowy urządzenia – zasób materiałowo – energetyczny niezbędny do odnowienia potencjału użytkowego urządzenia.

Procedura – ściśle określony sposób postępowania.

Proces – przebieg następujących po sobie i powiązanych przyczynowo w czasie określonych zmian stanowiących stadia, fazy etapy rozwoju czegoś.

Proces bezpieczeństwa – ciąg pojawiających się kolejno (pojedynczo) stanów bezpieczeństwa.

Proces eksploatacji urządzenia – przebieg następujących po sobie i powiązanych przyczynowo zmian stanów technicznych i eksploatacyjnych urządzenia, będących rezultatem istnienia określonych warunków jego eksploatacji i stosowanych do nich działań.

Prognozowanie – proces określania stanów urządzenia, które mogą zaistnieć w dowolnych chwilach, po sformułowaniu aktualnej diagnozy.

Ryzyko – (*w sensie opisowym*), to możliwość wystąpienia określonego zdarzenia (uszkodzenia, wypadku lub straty) – jest to nieodłączny atrybut każdej działalności człowieka. Na przykład „ryzyko zdarzenia” w warunkach stosowania MPDM. Ryzyko (*w sensie wartościującym*) jest miarą bezpieczeństwa (ściślej – niebezpieczeństwa) rozumiana jako *iloczyn rozmiaru skutków określonego zdarzenia* (np. uszkodzenia napędu głównego, uszkodzenia kadłuba statku itp.) *i prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia* (ewentualnie częstość jego pojawienia się).

Stan niezdatności urządzenia – taki stan techniczny (takie naruszenie spójności struktury konstrukcyjnej) urządzenia, które uniemożliwia dalsze użytkowanie tego urządzenia.

Stan niezdatności człowieka – taki stan fizyczny bądź psychiczny, bądź fizyczny i psychiczny, który uniemożliwia mu działanie.

Stanowisko pracy – miejsce, w którym realizowane jest jedno lub kilka zadań (mostek nawigacyjny, CMK, itp.).

Statek (statek morski) – obiekt techniczny przysposobiony do wykonania zadań, do których realizacji niezbędny jest jego ruch podczas pobytu na morzu.

Statek typu Ro-Ro (także **RO-RO**; *Roll On / Roll Off*, w języku polskim czasem określane jako "rorowce") – typ statku towarowego, pasażersko-towarowego przystosowanego do przewożenia ładunków tocznych i pojazdów (samochodów osobowych, ciężarówek lub wagonów kolejowych).

Sterowanie – oddziaływanie na urządzenia przez zmianę jego struktury konstrukcyjnej lub/i przez podejmowanie decyzji w celu uzyskania zamierzonego skutku.

Sterowanie decyzyjne – podejmowanie kolejnych decyzji umożliwiających uzyskanie zamierzonego skutku. Jest to sterowanie etapowe realizowane przez kolejno podejmowane decyzje umożliwiające osiągnięcie określonego celu.

Sterowanie parametryczne – uporządkowane oddziaływanie systemu sterującego, użytkownika i odpowiednich urządzeń, na parametry struktury konstrukcyjnej urządzenia umożliwiające uzyskanie racjonalnego przebiegu zachodzących w nim procesów. Sterowanie to może być ręczne lub automatyczne, w układzie otwartym lub w układzie zamkniętym.

System diagnostyczny – system, który składa się z systemów: diagnozowanego i diagnozującego.

System diagnozowany – przedmiot diagnozowania, którego badanie i wnioskowanie diagnostyczne są w celu uzyskania informacji o jego stanie i przydatności eksploatacyjnej, z uwzględnieniem elementów i relacji istniejących między nimi.

System diagnozujący – system przeznaczony do realizacji procesu diagnozowania, składający się z podmiotu diagnozowania (człowieka, zespołu ludzi) i środków diagnozowania (urządzeń diagnozujących, metod, algorytmów).

System eksploatacji (eksploatowania) urządzeń – system, którego zadaniem jest realizacja potrzeb systemu operacyjnego.

System jakości – struktura organizacyjna, procedury, procesy i zasoby niezbędne do zarządzania jakością.

System kierowania eksploatacją – system złożony z podzespołów decyzyjnego i informacyjnego, system o dwóch poziomach kierowania: programowania eksploatacji oraz sterowania eksploatacją.

System operacyjny – system generujący cel działania dla systemu eksploatacji urządzeń.

System decyzyjny – taki system, w którym realizowane jest sterowanie decyzyjne.

System użytkowania urządzeń – system, którego zadaniem jest realizacja potrzeb systemu użytkowania urządzeń.

System zaopatrywania materiałowo – technicznego – system, którego zadaniem jest realizacja potrzeb systemu obsługi.

Śledzenie – proces obserwacji zmian położenia obiektu lub jego cecha dla wyznaczenia parametrów ruchu.

Środowisko pracy – to ogół warunków materialnych i społecznych, w których wykonywana jest dana praca zawodowa, a zatem to wszystko, co otacza pracownika w toku wykonywania tej pracy.

System jakości – struktura organizacyjna, procedury, procesy i zasoby niezbędne do zarządzania jakością.

Śruba nastawna – pędnik statku z ruchomymi skrzydłami umożliwiającymi zmianę kąta skoku

Tornado – najsilniejsza odmiana cyklonowych wirów powietrznych.

Trend – monotoniczny składnik w modelu zależności badanej cechy statystycznej od czasu.

Uszkodzenie urządzenia – zdarzenie będące wynikiem zaistnienia niezdatności urządzenia.

Urządzenie – dowolny obiekt techniczny mający tę własność, że został wykonany przez człowieka do realizacji określonego celu działania. Wyraz „urządzenie” jest używany jako nazwa ogólna, umożliwiająca zdefiniowanie nazw różnych obiektów technicznych, na

przykład: maszyna jest to urządzenie złożone z elementów we wspólnej osłonie, umożliwiające przetworzenie energii lub wykonanie określonej pracy.

Użytkowanie – część ogółu zjawisk, zdarzeń, działań i procesów zachodzących w eksploatacji, które zostały zainicjowane a następnie podtrzymywane wyłącznie do realizowania postawionego przed użytkownikiem celu. Jest to wykorzystywanie urządzenia zgodnie z przeznaczeniem, do którego zostało ono przysposobione w fazach projektowania i wytwarzania.

Właściciel statku – osoba fizyczna lub prawna będąca jego armatorem i eksploatująca go na własny rachunek lub, która przekazała jednostkę innej osobie w celu dalszego zatrudnienia – na przykład w oparciu o umowę czarteru.

Wnioskowanie diagnostyczne – ciąg działań umożliwiających sformułowanie diagnozy w wyniku kolejnego przetwarzania pierwotnej informacji diagnostycznej.

Wskaźnik (urządzenia wskaźnikowe) – przyrząd, za pomocą którego uzyskuje się informacje optyczne.

Wypadek – zdarzenie, z którym związana jest utrata zdrowia bądź życia człowieka (ludzi), znaczne straty wynikające z uszkodzenia systemu, w tym związane ze skażeniem otoczenia. Wypadki wg ISM Code oznaczają zdarzenia powodujące utratę zdrowia, życia, szkodę dla statku, przewożonego ładunku lub dla środowiska naturalnego.

Wypadek morski – zdarzenie, które powoduje utratę zdolności lub ograniczenie zdolności statku do żeglugi w określonym czasie.

Zagrożenie – dowolna przyczyna (zdarzenie niepożądane), która może spowodować utratę zdrowia, życia, bezpieczeństwa. Wielkość zagrożenia może być określona w wyniku oszacowania ewentualnych strat w wyniku zajścia zdarzenia niepożądanego.

Zaopatrywanie – proces dostarczania środków technicznych do systemu eksploatacji urządzeń.

Zarządzanie jakością – wszystkie działania w zakresie ogólnego zarządzania, które mają wpływ na politykę jakości, podejmowane cele i zadania oraz na ich realizację w ramach systemu jakości za pomocą takich środków, jak: planowanie jakości, sterowanie jakością, zapewnienie jakości i doskonalenia jakości.

Wykaz ważniejszych oznaczeń użytych w pracy

CMK – centrala manewrowo kontrolna

D – średnica śruby

DTR – dokumentacja techniczno ruchowa

H – skok śruby

H/D – współczynnik skoku śruby

Js. – dziesiętnosekunda

M_d – moment zapotrzebowany przez śrubę

MOS – mechanizm obrotu skrzydeł

MZSS – mechanizm zmiany skoku śruby

N_d – moc zapotrzebowana przez śrubę

NSN – nadajnik skoku śruby

μ – sprawność śruby

p_s – ciśnienie w systemie hydraulicznym

p_{max} – maksymalne ciśnienie spalania

RO-RO – statek przysposobiony do przewożenia ładunków tocznych, pojazdów

SD – system diagnostyczny

SDG – system diagnozujący

SDN – system diagnozowany

SG – silnik napędu głównego (silnik główny)

SN – śruba o skoku nastawnym

ST – system sterowania

STN – system sterowany

STR – system sterujący

T – siła naporu śruby

T_N – siła napędzająca śruby

ZSN – zdatność śruby nastawnej

ZSM – zdalne stanowisko manewrowe

Rozdział I

WPROWADZENIE

1.1 Wstęp

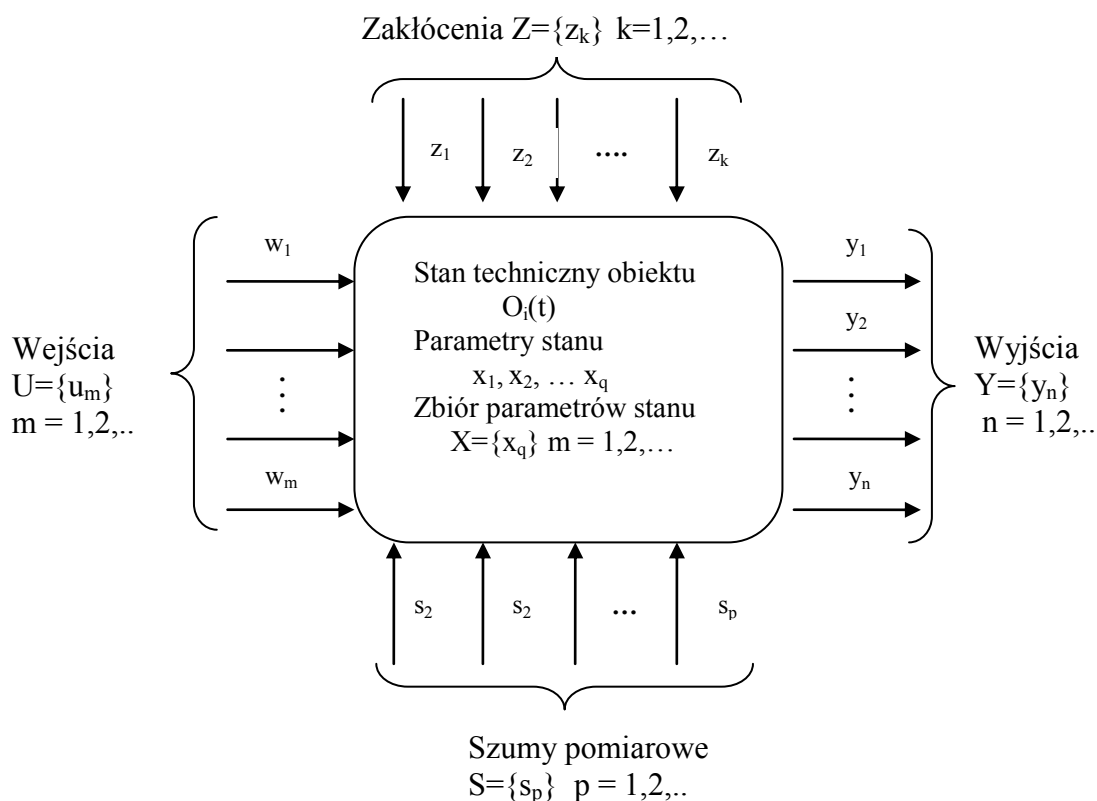
Transport morski to dziedzina gospodarczej działalności człowieka, która realizuje cele ekonomicznej i technologicznej wymiany towarowej. Jest on obecnie najtańszym środkiem transportu o największym przewożonym tonażu ładunków dzięki zastosowaniu najnowszych technologii w budowie statków morskich o różnych przeznaczeniach. Z uwagi na systematyczny wzrost wartości przewożonych ładunków, wartości statków jak i wzrost liczby statków uprawiających żeglugę morską / oceaniczną, bezpieczeństwo eksploatacji statków oraz bezpieczeństwo żeglugi staje się priorytetem działań międzynarodowych organizacji morskich (IMO) i armatorów uprawiających taką działalność. Ogólne warunki bezpiecznej eksploatacji statku zależą od tzw. bezpiecznego statku oraz warunków zewnętrznych, w jakich realizuje on swoje zadania. Prowadzone badania i wprowadzane nowe technologie jak do tej pory nie usunęły dystansu pomiędzy teoretycznym statkiem absolutnie bezpiecznym a statkiem rzeczywistym. Pojęcie statku absolutnie bezpiecznego pozostaje nadal nieokreślone, wynika to bowiem z braku możliwości zdefiniowania skończonych zagrożeń eksploatacyjnych, oraz skończonej definicji bezpiecznego i efektywnego użytkowania, gdyż uzależniona jest ono, od warunków zewnętrznych, w jakich statek realizuje swoje zadania, przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego jak i wytrzymałości użytych materiałów do budowy zainstalowanych na nim mechanizmów [1, 20, 21, 26, 36, 40, 58, 61].

Bezpieczeństwo statku (rzeczywistego) zależy od warunków jego ruchu. Ruch statku uzależniony jest od jego napędu. Aktualnie w zespołach napędu głównego powszechnie stosowane są silniki spalinowe wielkich i średnich mocy wytwarzające moment obrotowy, który jest przekazywany za pośrednictwem linii wałów na śrubę napędową.

Silnik spalinowy jest przetwornikiem energii, zawartej w paliwie, na energię mechaniczną wału śrubowego w ilości wynikającej ze sprawności układu napędowego, czyli najogólniej można powiedzieć, że energia chemiczna zawarta w paliwie zamieniana jest w formie ciepła na energię mechaniczną związaną z nadaniem kadłubowi statku określonej prędkości, a dokonuje się to za pośrednictwem śruby napędowej statku, a zatem wielkość śruby napędowej i jej obciążenia pozostają w ścisłym związku przyczynowo-skutkowym z pracą wykonywaną w jednostce czasu, a więc z mocą wytwarzaną przez silnik napędu głównego [2, 7, 14, 29, 52, 69].

Statki o dużej częstości manewrów, czyli specjalnego przeznaczenia, takie jak: pasażerskie, promy pasażersko-samochodowe, RO-RO, rybackie, holowniki, obsługowe wież wiertniczych, itp. wyposażone są w śruby napędowe o nastawnym skoku. Umożliwiają one efektywniejsze, w porównaniu do śrub o skoku stałym (nieregulowanym), wykorzystanie mocy w całym polu pracy silnika napędu głównego, a tym samym również zwiększające możliwości manewrowe statku. Jest to technicznie złożone urządzenie napędowe, umożliwiające bezstopniową regulację prędkości statku z zachowaniem wysokiej sprawności ogólnej napędu [15, 17, 29, 42, 52, 76, 84]. Tak więc bezpieczeństwo i niezawodność układu napędowego statku, z chwilą zainstalowania śruby nastawnej w jego układzie napędowym, zależą będzie, oprócz niezawodności silnika napędu głównego, także od niezawodności tak ważnego urządzenia układu napędowego, jakim jest śruba o skoku nastawnym. Silnik napędu głównego jest dostępny do obsługi w każdym czasie i stanie eksploatacyjnym, to śruba nastawna tej dogodności nie ma. Jest to bowiem ten zespół, który pracuje w dwóch przestrzeniach. Piasta z mechanizmem zmiany skoku znajduje się poza kadłubem, połączona jest wałem śrubowym z drugą jej częścią, jaką stanowią blok zadający oraz układ sterujący, które znajdują się wewnątrz kadłuba statku. Taka lokalizacja podsystemów (piasty z

mechanizmem zmiany skoku, zespołu rurowego, bloku zaworowego) sprawia, iż dostępność do niej jest ograniczona i wymaga dokowania statku. Jest to taki etap eksploatacji statku, który planowany i realizowany jest jako skutek, nieraz rozległych uszkodzeń, tzw. awarii tego rodzaju pędników. W planowym cyklu obsługowym przeglądy tego zespołu napędowego dokonywane są zależnie od wymogów utrzymania pełnej zdatności śruby napędowej o skoku nastawnym oraz wymogów towarzystw klasyfikacyjnych. Stan (niezdadności jak również zdadności częściowej) zespołu śruby nastawnej wpływa w sposób bezpośredni na bezpieczeństwo statku, ludzi na nim się znajdujących oraz efektywność finansową transportu morskiego statku wyposażonego w tego rodzaju pędnik. Zasadniczym zamierzeniem w projektowaniu, budowie i eksploatacji śrub o skoku nastawnym jest zapewnienie im jak najdłuższej poprawnej (bezawaryjnej) pracy, a tym samym i bezpieczeństwa statku. Bezspornym więc staje się wymóg utrzymania wysokiej sprawności i niezawodności zespołu napędowego ze śrubą nastawną. Aby ten stan utrzymać, staje się koniecznym diagnozowanie stanów technicznych i energetycznych śruby nastawnej i poprawnej interpretacji uzyskanych wyników. Służyć temu powinna diagnostyka, która zapewnia zbiór informacji o obiekcie i jego otoczeniu oraz wzajemnych relacjach występujących między nimi. Oczywiście jest, że istotna jest tu diagnostyka w odniesieniu do maszyn i urządzeń nazywana diagnostyką techniczną, której celem jest określenie stanu technicznego urządzeń za pomocą obiektywnych metod i środków [1, 5, 21, 24, 26, 28, 36, 38, 45, 54, 55, 58, 59]. Jest ona realizowana dla podwyższenia ich trwałości, niezawodności i efektywności działania w określonym czasie.



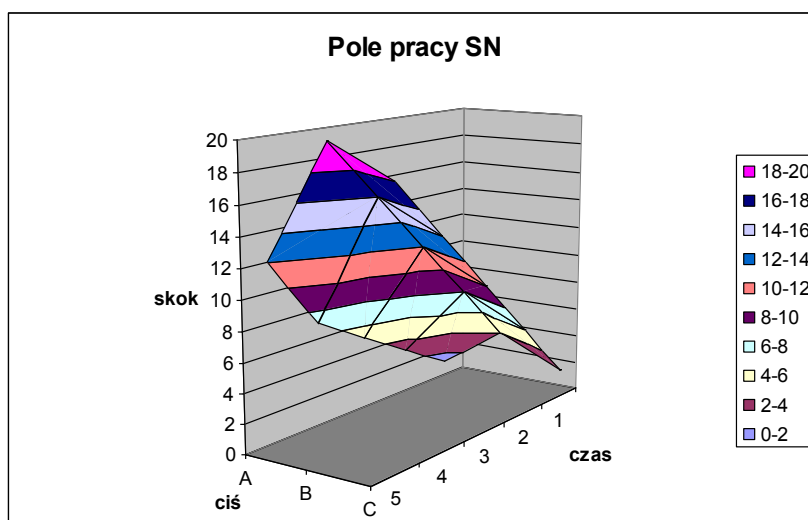
Rys.1.1. Obiekt techniczny jako system:

X – zbiór zmiennych stanu (parametry stanu); U – zbiór zmiennych wejściowych (wymuszenia); Y – zbiór zmiennych wyjściowych (parametrów diagnostycznych); Z – zbiór zmiennych zakłóceń; S – szumy pomiarowe zmniejszające dokładność pomiarów

Tak więc obiekt badań diagnostycznych tj. (układ śruby nastawnej) musi być wtedy rozpatrywany jako system w którym wyodrębnia się zmienne:

- stanu X (parametry struktury konstrukcyjnej)
- wejściowe U (prędkość obrotowa śruby, skok śruby, prędkość postępową śruby)
- wyjściowe Y (siła naporu, moment śruby, prędkość statku)
- zakłócenia Z (parametry akwenu, warunki zewnętrzne, błędy załogi)
- szумы pomiarowe S (klasa dokładności mierników, dokładność / powtarzalność pomiaru)

Dla realizacji tego celu należy stworzyć model diagnostyczny śrub nastawnych dla potrzeb sterowania procesem ich eksploatacji oraz określaniu zmian ich walorów użytkowych. Ponieważ proces zużywania się śrub nastawnych podobnie jak maszyn i innych urządzeń ma charakter ciągły, niedający przesłanek do naturalnego rozgraniczenia stanów, cechujący się wysoką nieoznaczonością procesu, istotnym staje się kontrola trendów tych procesów i wyznaczanie klas stanów technicznych wspomnianych śrub [1, 2, 5, 19, 20, 25, 28, 34]. Zatem koniecznym staje się przeprowadzenie analizy działania zespołu śruby nastawnej, realizacji procesu sterowania nią oraz dokonywania obsługi okrętowych śrub napędowych o skoku nastawnym. Parametry pracy śruby nastawnej mogą być i są mierzone w sposób ciągły, dając możliwość kontroli wartości wielkości zmieniających się wskutek postępującej jej degradacji w zespole, gdyż mogą wskazywać na własności zachodzących zmian w procesie użytkowania. Są to mierzalne parametry i możliwe do przetworzenia, mogą i powinny służyć decyzyjnemu sterowaniu procesem eksploatacji śrub nastawnych zespołu napędowego statku, jak również mogą służyć do zbudowania przestrzennego wykresu pola pracy, będącego częścią wiedzy dotyczącej diagnostyki stanu urządzeń śruby nastawnej. Pole pracy śruby nastawnej (SN) zostało określone przez autora i przedstawione w formie wykresu pola pracy na rys. 1.2.

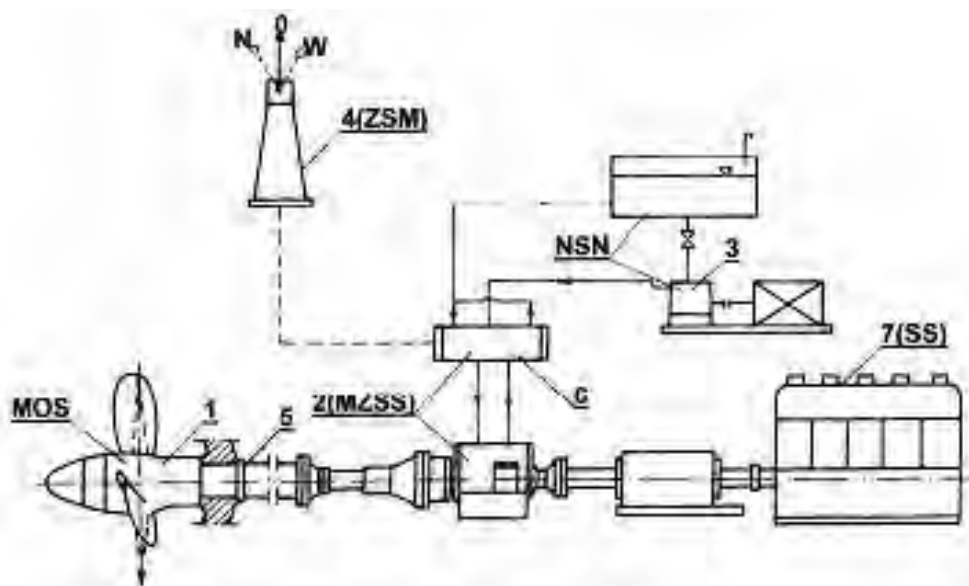


Rys.1.2. Przykładowy wykres pola pracy śruby o skoku nastawnym

Z rozważań wynika, że zastosowanie diagnostyki w decyzyjnym sterowaniu procesem eksploatacji okrętowych śrub napędowych o skoku nastawnym ma istotne znaczenie. W przypadku układów napędowych statków, czyli takich układów, które zapewniają ruch statku, diagnostyka taka jest nieodzowna, co wynika z dążenia armatorów do całkowitego zautomatyzowania działania (pracy) tych układów. W tej sytuacji ważna jest nie tylko diagnostyka wspomnianych układów napędowych silników głównych (silników napędu głównego), lecz także diagnostyka śrub napędowych o skoku nastawnym wchodzących w skład takich układów. Diagnostyka tego rodzaju śrub jest równie ważna jak silników

głównych, dlatego że są one złożonymi układami składającymi się z następujących urządzeń [17, 39, 43, 45, 58, 83, 84]:

- śruby okrętowej z ruchomymi skrzydłami, nazywanej śrubą nastawną (*SN*), przymocowanej do wału śrubowego,
- mechanizmu obrotu skrzydeł (*MOS*), umieszczonego wewnątrz piasty *SN*, umożliwiającego poruszanie skrzydeł śruby,
- mechanizmu zmiany skoku śruby (*MZSS*), za pomocą którego napędzany jest *MOS*,
- nadajnika śruby nastawnej (*NSN*), który służy do zasilania energetycznego *MZSS*,
- zdalne stanowisko manewrowe (*ZSM*), za pomocą którego nadawane są dyspozycje *NSN*.



Rys. 1.3. Schemat zespołu napędowego ze śrubą nastawną [38]:

1 – śruba z ruchomymi skrzydłami w piaście, której znajduje się *MOS*; 2 – mechanizm zmiany skoku śruby (*MZSS*); 3 – pompa nadajnika śruby nastawnej (*NSN*); 4 – kolumna sterownicza zdalnego stanowiska manewrowego (*ZSM*); 5 – wał śrubowy, z teleskopowymi rurami olejowymi, na którym jest osadzona śruba napędowa (1); 6 – skrzynia zaworowa *MZSS*; 7 – silnik główny, czyli silnik spalinowy napędzający śrubę (1).

Dążenie do całkowitego zautomatyzowania działania (pracy) układów napędowych statków wynika głównie z potrzeby ograniczenia oddziaływania bezpośrednich użytkowników tych układów na ich pracę i zmniejszenia liczby uszkodzeń powstałych wskutek błędów załogi popełnianych podczas eksploatacji. W rezultacie rośnie trwałość zespołów napędowych ze śrubami nastawnymi, a przy tym ich działanie jest bardziej niezawodne. Utrzymanie wysokiej trwałości śrub nastawnych, podobnie jak silników głównych układów napędowych statku, jak też ich niezawodność, wymaga odpowiedniego sterowania, rozumianego jako uporządkowane oddziaływanie użytkowników i odpowiednich urządzeń systemu sterującego na parametry struktury konstrukcyjnej śrub nastawnych (jako systemów sterowanych – *STN*) i zarazem diagnozowanych – *SDN*), zmierzające do uzyskania optymalnego przebiegu zachodzących w nich procesów, a w konsekwencji – procesów ich eksploatacji. Sterowanie takie jest możliwe w przypadku zastosowania odpowiednich systemów diagnozujących (*SDG*), generujących sygnały zapewniające ciągłość automatycznego sterowania daną śrubą nastawną za pomocą odpowiednich systemów sterujących (*STR*) z uwzględnieniem sytuacji awaryjnych (powodujących zagrożenie). Wobec tego zastosowanie diagnostyki wymaga opracowania i wdrożenia odpowiednich systemów

sterowania (*ST*) i diagnostycznych (*SD*), które mogą być nazywane również systemami diagnozowania.

System sterowania (*ST*) jest systemem składającym się z dwóch podsystemów (systemów): sterowanego (*STN*), którym jest śruba nastawna i sterującego (*STR*). System diagnostyczny (*SD*) składa się z dwóch podsystemów (systemów): diagnozowanego (*SDN*), którym jest śruba nastawna i diagnozującego (*SDG*). W tej sytuacji zachodzi potrzeba uwzględnienia w procesie decyzyjnym niezawodności systemu sterującego (*STR*) i systemu diagnozującego (*SDG*), co wymaga określenia wiarygodności diagnoz generowanych przez system diagnozujący. System taki powinien być dostosowany do potrzeb identyfikacji stanów technicznych i energetycznych śruby nastawnej jako systemu sterowanego i zarazem diagnozowanego (*STN* i *SDN*). System diagnozujący (*SDG*) powinien przy tym wymuszać pożądane funkcjonowanie systemu sterowania (sterującego i sterowanego), stosownie do przebiegu implikujących się wzajemnie procesów zmian stanów technicznych i energetycznych śruby nastawnej, podobnie jak to jest w przypadku silnika głównego [24, 31, 32, 38, 41, 58, 63].

Z rozważań tych wynika, że zastosowanie diagnostyki w decyzyjnym sterowaniu procesem eksploatacji śrub nastawnych wymaga identyfikacji tego problemu. Dla śrub nastawnych zespołu napędu głównego nie ma jak dotąd opracowanych diagnostycznych modeli służących do sterowania procesem ich eksploatacji a w efekcie przewidywania ich degradacji technicznej.

Z tego względu oraz z powodów bezpieczeństwa statku i środowiska problematyka ta została podjęta w tej pracy, przy czym rozważania przeprowadzone zostały z uwzględnieniem możliwości stosowania tego modelu dla całej grupy tego rodzaju śrub. Takie ujęcie zagadnienia i stworzenie modelu umożliwi przewidywanie i prognozowanie stanów pracy zespołu śruby nastawnej, a tym samym podjęcie wcześniejszych czynności obsługowych celem utrzymania stanu jej zdatności technicznej i uniknięcie jej awarii mogących skutkować zanieczyszczeniem środowiska, kolizją statku oraz pomniejszeniem efektywności ekonomicznej przewozów morskich, jak również umożliwi wprowadzanie nowych rozwiązań technicznych w konstruowaniu pędników ze śrubami o skoku nastawnym.

Zdecydowano się na opracowanie probabilistycznego modelu śruby nastawnej, dlatego że z teorii i praktyki eksploatacyjnej tych śrub wynika, że zmiana stanu tego rodzaju śrub następuje w czasie, który stanowi zmienną losową. Zatem do opisu czasu poprawnej pracy śrub nastawnych trzeba zastosować rachunek prawdopodobieństwa i statystykę matematyczną. Drugim powodem opracowania takiego modelu diagnostycznego są dokonania mechaniki kwantowej, z której wynika, że nie można przewidzieć zmiany jakiegokolwiek systemu empirycznego, lecz jedynie prawdopodobieństwo wystąpienia (zaistnienia) takiej zmiany. Z tego powodu został sformułowany taki cel pracy, jaki został przedstawiony w punkcie 1.2.

1.2 Cel pracy

Celem pracy jest opracowanie probabilistycznego modelu diagnostycznego śruby nastawnej dla potrzeb sterowania procesem eksploatacji tego rodzaju pędników.

Model jest niezbędny do zbudowania takiego systemu diagnozującego stan techniczny śrub nastawnych (jako systemów diagnozowanych) aby było możliwe prognozowanie tego stanu.

Prognozowanie stanu śrub nastawnych wymaga opracowania diagnozy o stanie w danej chwili oraz określenia stanu tej śruby w przyszłości interesującej użytkownika. Wymaga to przyjęcia hipotezy, której treść została przedstawiona w punkcie 1.3 tej pracy.

1.3 Hipoteza naukowa

Hipoteza: *prognozowanie stanu procesu eksploatacji śrub nastawnych w chwili $t+\Delta t$, gdy znany jest tylko ich stan w chwili t , jest możliwe dlatego, ponieważ stan tych śrub w chwili $t+\Delta t$, i czas jego trwania zależy istotnie od stanu w chwili t a nie od stanów, które zaszły wcześniej i przedziałów czasu ich trwania.*

1.4 Teza pracy

Teza: *zastosowanie probabilistycznego modelu diagnostycznego śruby nastawnej umożliwi bardziej racjonalne sterowanie procesem eksploatacji tego rodzaju pędników.*

Teza jest częścią twierdzenia empirycznego, o następującym założeniu: nieznan, domniemany stan techniczny śruby nastawnej można określić tylko w przybliżeniu przez jednoznaczne oszacowanie prawdopodobieństwa jej zużycia. To założenie jest pierwszym członem wspomnianego twierdzenia, które w ujęciu formalnym można przedstawić w formie zapisu $T_w: Z \Rightarrow T$ i napisać następująco: jeżeli nieznan, domniemany stan techniczny śruby nastawnej można określić tylko w przybliżeniu przez jednoczesne oszacowanie prawdopodobieństwa jej zajścia, to zastosowanie probabilistycznego modelu diagnostycznego śruby nastawnej umożliwia bardziej racjonalne sterowanie procesem eksploatacji tego rodzaju pędników. Słuszność tego twierdzenia wynika z tego, że oszacowanie prawdopodobieństwa zajścia danego stanu technicznego umożliwia zastosowanie statystycznej teorii decyzji do sterowania procesem eksploatacji śrub nastawnych, które polega na wyborze najkorzystniejszej decyzji spośród możliwych do podjęcia. Kryterium wyboru takiej decyzji jest wartość oczekiwana konsekwencji. Zgodnie z tym kryterium podejmowana jest ta decyzja, której odpowiada największa wartość oczekiwana konsekwencji [37, 40, 58, 63].

1.5 Zagadnienia podjęte w pracy

Osiągnięcie celu sformułowanego w pkt. 1.3 tej pracy wymagało opracowania następujących zagadnień:

- analiza dorobku naukowego w zakresie tworzenia modeli diagnostycznych śrub nastawnych i innych obiektów technicznych,
- identyfikacji śruby nastawnej jako systemu energetycznego użytkowanego i obsługiwanego, a przy tym diagnozowanego i sterowanego,
- modelowanie funkcjonowania śruby nastawnej (uzasadnienie modelowania systemowego),
- ustalenie relacji diagnostycznych między, stanem technicznym śruby nastawnej a parametrami diagnostycznymi z uwzględnieniem wyników badań empirycznych,
- opracowanie relacyjnego modelu diagnostycznego śruby nastawnej i wykazanie jego praktycznej przydatności,
- analiza wyników badań, weryfikacja hipotezy, udowodnienie tezy.

W badaniach empirycznych zostały zastosowane następujące metody badawcze:

- do weryfikacji hipotezy – metoda wnioskowania indukcyjnego nazywana wnioskowaniem redukcyjnym,
- do udowodnienia tezy – reguła odrywania inferencyjnego z zastosowaniem metody *modus ponens*, reguła ta jest szczególnym przypadkiem wnioskowania inferencyjnego [30, 64],
- do opracowania probabilistycznego modelu diagnostycznego - metoda systemowa.

Wykonanie pracy umożliwiło uzyskanie wyników o walorach zarówno poznawczych, jak również użytkowych. Walorem poznawczym i zarazem użytkowym jest relacyjny model diagnostyczny śruby nastawnej. Jest to model symptomowy, opisujący stan techniczny śruby nastawnej w kategorii obserwowanych parametrów diagnostycznych w czasie działania (pracy) śruby bez uwzględniania czasu dynamicznego [27, 43, 58, 63, 68, 78]. W pierwszym przypadku dlatego, że model ten umożliwi identyfikację stanu technicznego śruby nastawnej w warunkach rzeczywistych i przewidywania (wskutek zastosowania wniosku eksploatacyjnego) stanów, które mogą pojawić się w przyszłości. Zastosowanie tego modelu w praktyce może ułatwić podejmowanie decyzji związanych z dalszym użytkowaniem śruby tego rodzaju lub też poddaniem jej obsłudze profilaktycznej w celu odnowy stanu technicznego tej śruby. Wymagać to będzie opracowania, odpowiedniego do tego modelu, systemu diagnozującego śruby nastawnej.

Praca ta składa się z 8 rozdziałów. Przed pierwszym rozdziałem podano definicje podstawowych pojęć użytych w pracy i wykaz ważniejszych oznaczeń. Po ósmym rozdziale zamieszczone zostało podsumowanie w formie uwag i wniosków końcowych.

Rozdział I pt. „Wprowadzenie” przedstawia uzasadnienie podjęcia tematu pracy oraz wykazuje znaczenie śruby nastawnej w układzie napędowym statku, wpływ na jego bezpieczeństwo oraz problematykę decyzyjnego sterowania eksploatacją tego mechanizmu, a także jego trwałość i niezawodność. Wskazano na rolę diagnostyki w procesie decyzyjnego sterowania. Przedstawiono cel pracy, hipotezę naukową, tezę pracy oraz zagadnienia podjęte w pracy.

Rozdział II pt. „Identyfikacja problemu tworzenia modeli diagnostycznych śrub o skoku nastawnym” zawiera przegląd modeli diagnostycznych, problematykę diagnozowania i monitorowania stanu pracy tych urządzeń, oraz możliwości zastosowania diagnostyki do oceny stanu przydatności w aspekcie bezpiecznej eksploatacji układu napędowego statku.

Rozdział III pt. „Znaczenie diagnostyki w eksploatacji śrub nastawnych” przedstawia identyfikację śruby nastawnej jako obiektu sterowania. Wyodrębniono stany techniczne i energetyczne śruby nastawnej, oraz procesy eksploatacyjne tego mechanizmu. Wskazano na konieczność zastosowania diagnostyki do sterowania procesem eksploatacji pędnika statku jakim jest śruba nastawna.

Rozdział IV pt. „Śruba nastawna jako obiekt diagnozowania” prezentuje własności techniczno-eksploatacyjne śrub nastawnych, obciążenia jakim one podlegają oraz zużycia w procesie eksploatacji. Omówiono uszkodzenia eksploatacyjne śrub nastawnych oraz możliwości ich przewidywania, a tym samym zapobiegania im.

Rozdział V pt. „Zbiór stanów technicznych śruby nastawnej uwzględnionych w modelu diagnostycznym” opisuje wyszczególnione zbiory stanów śruby nastawnej, do których należą: zbiór pełnej zdatności SN , częściowej zdatności SN oraz zbiór stanów niezdatności SN .

Rozdział VI pt. „Zbiór parametrów diagnostycznych do identyfikacji stanów technicznych śruby nastawnej” zawiera opis zbiorów parametrów mechanicznych, wibroakustycznych oraz parametrów charakteryzujących własności fizyko-chemiczne mediów roboczych niezbędnych do identyfikacji stanów technicznych śrub nastawnych.

Rozdział VII pt. „Relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów technicznych śruby nastawnej w zbiór parametrów diagnostycznych” przedstawia relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów pełnej zdatności w zbiór parametrów diagnostycznych, oraz omówiono relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów częściowej zdatności w zbiór parametrów diagnostycznych i relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów niezdatności w zbiór parametrów diagnostycznych.

Rozdział VIII pt. „Możliwości zastosowania modelu diagnostycznego śruby nastawnej w praktyce eksploatacyjnej” przedstawiono walory opracowanego modelu diagnostycznego

śruby nastawnej, możliwości weryfikacji opracowanego modelu oraz propozycje rozbudowy i dalsze kierunki badań.

Wynikające z pracy wyniki badań zostały scharakteryzowane w „Podsumowaniu”, które zawiera uwagi końcowe i wnioski. Na końcu pracy podany został spis literatury obejmujący 105 pozycji. Do pracy dołączone zostały 2 załączniki zawierające wiedzę dotąd niepublikowaną, ale użyteczną do napisania pracy doktorskiej.

Rozdział II

Identyfikacja problemu tworzenia modeli diagnostycznych śrub o skoku nastawnym

2.1 Uwagi wstępne

Wraz z rozwojem technik wytwarzania i konstruowania, nastąpił też wzrost osiąganych i przenoszonych mocy przez urządzenia zainstalowane na statkach. Liczebność elementów konstrukcyjnych użytych do zmontowania, aktualnie budowanych urządzeń, wzrosła niemalże stukrotnie w porównaniu do ich pierwowzorów, a w efekcie wzrosła i liczebność czynników wpływających na możliwe awarie tych urządzeń. Ponieważ wiedza i możliwości intelektualne operatora (członka załogi statku) jest ograniczona, a w związku z tym i wyniki każdego jego rozumowania i przewidywania również obarczone są niepewnością, w konsekwencji tego, istnieje bardzo duże prawdopodobieństwo podjęcia niewłaściwych decyzji eksploatacyjnych, będących wynikiem sformułowania błędnej diagnozy. Tak więc błędna diagnoza może doprowadzić do uszkodzenia lub nawet zniszczenia urządzenia. W celu przeciwdziałania uszkodzeniom urządzeń okrętowych wskutek podjęcia błędnej decyzji podejmowanej często w warunkach niepewności, tworzone są modele diagnostyczne dla tych urządzeń. Dotyczy to zwłaszcza układów napędowych statków, którego częścią, jedną z najistotniejszych, jest zespół śruby napędowej o skoku nastawnym. Ciągłe udoskonalanie śrub nastawnych (*SN*) wymusza też rozwój ich modeli diagnostycznych. Szczególnego znaczenia nabiera ten problem, jeśli zdamy sobie sprawę z faktu, że *SN* jest jedynym mechanizmem zainstalowanym na statku, który pracuje w dwóch przestrzeniach. Jedną jego część, piastę z płatami pracuje na zewnątrz kadłuba statku (w wodzie zaburtowej), druga natomiast tj. mechanizm zmiany skoku, rurowy wał śrubowy, pracuje w przestrzeni siłowni okrętowej. Ponieważ wynika z tego ograniczony dostęp do tego urządzenia podczas jego użytkowania, wymusza to wymaganą jakość i precyzję systemu diagnozującego. Bezpieczeństwo i niezawodność śrub o skoku nastawnym jako systemu diagnozowanego (*SDN*) w znacznej mierze zależy od efektywności metod wykorzystywanych do ich diagnozowania, dlatego istotnym staje się tworzenie systemów diagnozujących (*SDG*), ujmujących w sobie możliwości wieloaspektowej oceny ich stanu technicznego, ponadto powinny być one przysposobione do wspomagania użytkownika w podejmowaniu trafnej decyzji lub działania przez osobę obsługującą / nadzorującą śrubę o skoku nastawnym. Sprawne działanie takiego systemu wymaga wyposażenia śruby o skoku nastawnym w elementy / układy o wymaganej precyzji i czułości pomiarowej oraz trafnym ich rozlokowaniu na elementach konstrukcyjnych. Wiedza o tych śrubach wynika z teorii, badań modelowych oraz z gromadzonych informacji podczas ich użytkowania, co ma istotne znaczenie przy tworzeniu ich modeli diagnostycznych. O ile system diagnozujący (*SDG*) jest zdefiniowany rodzajem przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego dla danej śruby o skoku nastawnym jako systemu diagnozowanego (*SDN*) i może ulegać zmianie (w oparciu o aktualny stan wiedzy) w krótkich przedziałach czasowych, o tyle śruba o skoku nastawnym podlega znacznie większym ograniczeniom niż system diagnozujący (*SDG*), co wynika ze specyficznych warunków jej pracy, powodując większą bezwładność czasową. Śruba o skoku nastawnym jest złożonym urządzeniem technicznym, której działanie jest mocno zależne od czynników zewnętrznych i mechanizmów współpracujących, a co za tym idzie duża bezwładność zmian wartości parametrów charakteryzujących zachodzące w niej przemiany energetyczne. W świetle powyższego, w celu uzyskania wymaganej i możliwej (w danych warunkach eksploatacyjnych) bezawaryjności i bezpieczeństwa (ludzi i mechanizmów) wskazanym byłoby stworzenie systemu monitoringu ciągłego śruby

nastawnej, jak: np. podobnego do SHM – „Structural Health Monitoring” stosowany w lotnictwie; system Noris, Bailley, Kim Moland-Macon przeznaczone do nadzoru pracy całej siłowni okrętowej. Jednakże takie systemy będą sprawne, jeżeli zbuduje się odpowiedni matematyczny model diagnostyczny, ujmujący wszystkie procesy zachodzące w śrubie nastawnej podczas jej użytkowania, który w oparciu o pomierzone parametry przez system diagnozujący, będzie umożliwiał bądź wspomagał identyfikację aktualnego stanu technicznego śruby, jako systemu diagnozowanego. Spośród wielu modeli matematycznych, jak np. modeli, do badań został przyjęty model probabilistyczny jako najbardziej odpowiedni, gdyż morskie warunki eksploatacyjne nie są zdeterminowane lecz są stochastyczne [24, 26, 30, 37, 45, 55, 58, 62, 85, 86].

2.2 Przegląd modeli diagnostycznych śrub nastawnych

W miarę rozwoju pędników okrętowych i stawianych im wymagań zmieniały się też modele matematyczne stosowane w procesach projektowania i wytwarzania tych mechanizmów. Rodzaj modelu często był determinowany zdolnością pomiarową wybranych parametrów podczas użytkowania, a tym samym małą podatnością tak *SDN* jak i *SDG* do wzajemnej współpracy oraz założeniem aby ilość parametrów diagnostycznych była wystarczająca do możliwości percepcyjnych użytkownika sterującego procesami eksploatacyjnymi.

Model deterministyczny jest modelem matematycznym, w którym na wejściu zdarzenia przypisuje się ścisły i jednoznaczny konkretny stan, a więc każdemu parametrowi diagnostycznemu odpowiada jednoznaczna wartość cechy stanu, opis modelu nie zawiera żadnych cech losowości. Wynika z tego, że w modelu deterministycznym przesądzona jest jakakolwiek ewolucja układu i zależy ona wyłącznie od parametrów początkowych lub ich wartości poprzednich. Model ten przydatny jest w opisie wielu zjawisk fizycznych, przy analizie i opisie funkcjonalnym poszczególnych faz zjawisk i procesów w warunkach przyjętych za normalne, jak również podczas badań eksperymentalnych ale w warunkach niezmiennych. W takich badaniach, i opisie parametrów diagnostycznych, przekroczenie wartości krytycznej (założonej i uznanej jako graniczne) sygnalizowane jest wyselekcjonowanym alarmem. A więc model ten jest trudno zastosować do odwzorowania skomplikowanego *SD*, w którym *SDN* jest śruba o skoku nastawnym, podlegająca losowym zmianom warunków pracy. Wielość i jakość stawianych zadań *SDN* wymusza ciągły rozwój i tym samym zadań stawianych *SDG*. Jest to powód, aby w nauce i praktyce były równolegle stosowane modele pseudodeterministyczne i probabilistyczne.

Model pseudodeterministyczny, np. regresyjny bądź niejawny typu obrazu jest też modelem deterministycznym, w którym przyporządkowanie parametrów diagnostycznych i cech stanu obarczone są zakłóceniami w czasie diagnozowania i są uwzględniane przez ten model. Wynika stąd konieczność oszacowania wiarygodności diagnozy o stanie śruby, gdyż w szczególnych przypadkach małe odchyłki wartości wejściowych mogą prowadzić do znacznych zmian w wynikach końcowych. Opisowi deterministycznemu można przeciwstawić model probabilistyczny.

Model probabilistyczny tj. taki model, w którym wyniki początkowe wpływają na wyniki końcowe z pewnym prawdopodobieństwem. Jeśli takie zakłócenia są nieuniknione i posiadają znaczną wartość, korzystniejszym jest więc zastosować do opisu wspomnianego przyporządkowania model probabilistyczny. Jest on szczególnie przydatny w zmiennych warunkach eksploatacyjnych lub awaryjnych, co wpływa na precyzyjniejsze odwzorowanie

realnych warunków morskich, a przez to dokładniejsze wypracowanie informacji wspierającej operatora w podjęciu racjonalnej decyzji eksploatacyjnej. W rozpatrywaniu zagadnienia należy brać pod uwagę nie tylko stochastyczny charakter zachodzących zmian w warunkach użytkowania, lecz również taki sam dobór załóg maszynowych statku, co wynika z różnej wiedzy i praktyki osób obsługujących takie mechanizmy. Wymusza to wysoką jakość *SDG* i tym samym użyteczną informację wspierającą działanie załogi, która powinna być trafna i wiarygodna. Aby uzyskać taki skutek, mając na uwadze złożoność struktury śruby o skoku nastawnym, oraz wieloaspektowość/wielokrotność oceny jej stanów, uzasadnione znajduje zastosowanie modelu relacyjnego, który jest modelem symptomowym odwzorowującym zbiór stanów technicznych *SDN* w zbiór parametrów diagnostycznych z pominięciem czasu dynamicznego działania *SDG*. Aby budować, bardzo przydatne, systemy diagnozujące *SDG* śrub o skoku nastawnym, niezbędne stają się modele diagnostyczne umożliwiające budowanie takich systemów. Przedstawione rozważania zostały dokonane na bazie literatury [13, 27, 30, 51, 58, 63, 78, 86, 87, 88]

2.3 Systemy diagnozujące śrub nastawnych

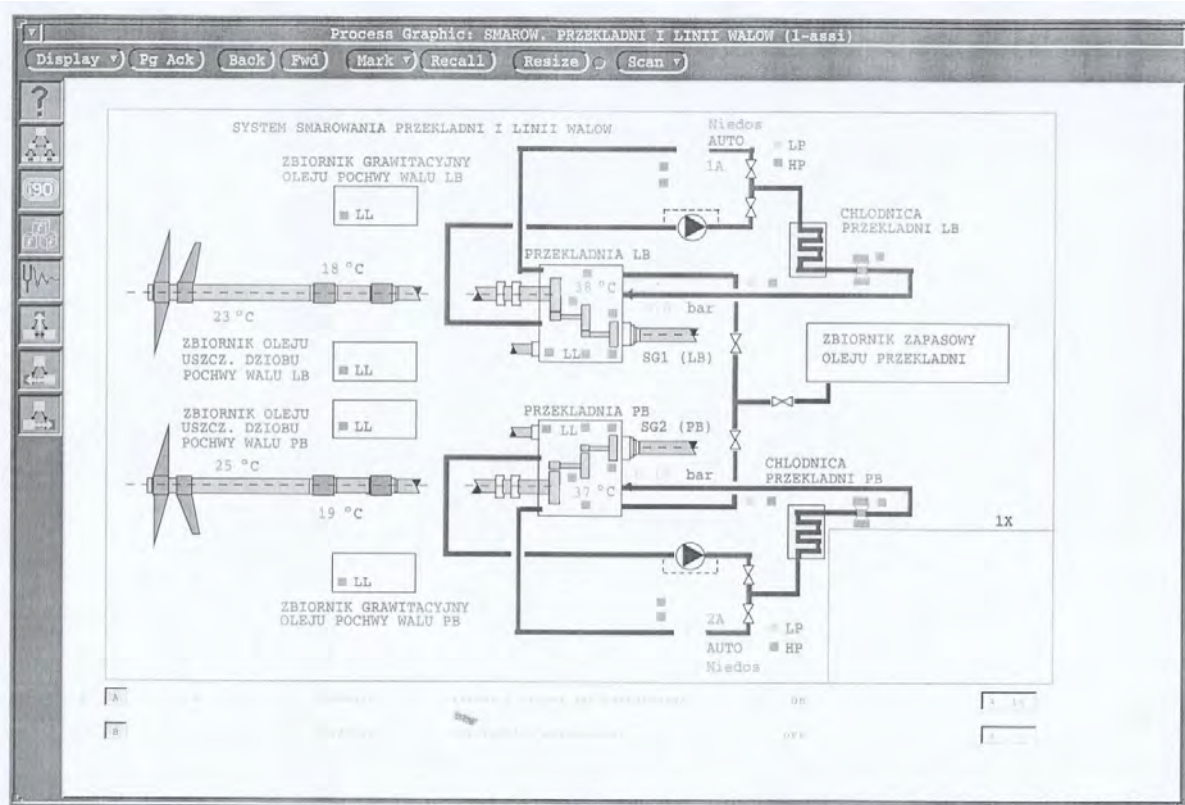
Śruby nastawne jako okrętowe pędniki podlegają złożonym obciążeniom wynikającym z warunków pracy. Kontrola parametrów pracy mediów roboczych w układach *SN* jest nadzorowana przez systemy nadzoru pracy całej siłowni, jako jeden z bloków systemów pomiarowo rejestrującego i wykonawczego. Są to takie systemy jak np.:

BAILLEY – *Canada* - (w aspekcie pracy *SN*) jest systemem kontroli i rejestracji wybranych parametrów pracy układu *SN*. Zawiera w sobie wizualizację jako jednokreskowe schematy mnemoniczne kontrolowanych obiegów z zaznaczeniem lokalizacji punktów pomiarowych (rys. 2.1; rys. 2.2). Taki układ w połączeniu z programem „Task Asystent” służy do wspierania mechanika w obsłudze codziennej i okresowej mechanizmów śruby nastawnej [99].

NORIS – *Niemcy* - (w aspekcie pracy *SN*) zawiera on w sobie pomiar ciągły parametrów pracy mediów roboczych tego układu oraz możliwość rejestracji trendów pomierzonych wyszczególnionych parametrów pracy (rys. 2.3). Jest ta funkcja bardzo przydatna w ocenie stanu technicznego *SN* oraz planowaniu prac obsługowych. Poprzez ciągłą kontrolę parametrów pracy, przedstawianą w formie wykresu, ułatwia podjęcie decyzji eksploatacyjnej oraz daje możliwość planowania bezpiecznej eksploatacji tego mechanizmu [98].

KIM–MOLAND MACON – *Norwegia* - (w aspekcie pracy *SN*) podobnie jak opisane powyżej systemy rejestruje parametry pracy układu *SN* oraz dodatkowo rejestruje czas zaistniałych zakłóceń wartości kontrolowanych parametrów, odbiegających od wartości projektowych. Rejestruje również czas zakłóceń chwilowych, nawet jeśli trwałyby one tylko kilka sekund, oraz czas od chwili zaistnienia zakłócenia do chwili jego ustania lub usunięcia. Daje to możliwość oceny powtarzalności chwilowych zakłóceń oraz tworzenia bazy danych służące planowaniu obsługi nieplanowych. Ponadto system ten posiada blok typu Ulstein do jazdy w lodach, który daje możliwość programowanego obciążenia zespołu napędowego statku. W powiązaniu z programem *MRS* (Maintenance Report System), służy mechanikom w codziennej i okresowej obsłudze mechanizmów siłowni w tym zespole *SN* [100]. Przykładowe karty tych programów przedstawiono na rys. 2.1 ÷ 2.3

Aktualnie stosowane systemy monitoringu pracy siłowni okrętowych ujmują w sobie kontrolę parametrów pracy wybranych mediów roboczych.



Rys. 2.1 Schemat mnemoniczny smarowania przekładni linii wałów z aktualnymi wartościami kontrolowanych parametrów – BAILLEY [99]

Process Graphic: Alarm Summary (standard) (AlmSumm)

A									
B									
C									
D									
E	09:23:47AM	05/24/11	AUDDA315	PRADNICA WALOWA NR1-ZABLOKOWANA	ON			A	16
F	09:23:46AM	05/24/11	ABSF0293	SG1-BLOKADA SERWOMOTORU	OFF			A	1
G	09:23:38AM	05/24/11	AUDDA415	PRADNICA WALOWA NR2-ZABLOKOWANA	ON			A	16
H	09:23:37AM	05/24/11	ABSF0294	SG2-BLOKADA SERWOMOTORU	OFF			A	2
I	09:23:11AM	05/24/11	ABSF0063	FILTR AUT OLEJU SG1-ZABRUDZONY	OFF			A	9
J	09:22:08AM	05/24/11	ABSF0064	FILTR AUT OLEJU SG2-ZABRUDZONY	OFF			A	10
K	09:15:33AM	05/24/11	ABSF0248	SRUBA NAST PB-NIS CISN OLEJ STER	1	6 BAR		L	10
L	09:15:22AM	05/24/11	ABSF0247	SRUBA NAST LB-NIS CISN OLEJ STER	0.3	6 BAR		L	9
M	09:11:18AM	05/24/11	ABSF0308	SG1-REDUKCJA OBCIAZENIA (EC 40)	OFF			A	17
N	09:11:15AM	05/24/11	ABSF0309	SG2-REDUKCJA OBCIAZENIA (EC 40)	OFF			A	17
O									
P									
Q									
R									
S									
T									
U									
V									
W									
X									
Y									

Rys. 2.2 Wydruk zarejestrowanych alarmów z prezentacją czasu i zarejestrowanych wartości parametrów, identyfikacją alarmu i jego grupy rejestrowej – BAILLEY [99]



Rys. 2.3 Wykres trendów mierzonych parametrów pracy wyszczególnionych układów roboczych, na wykresie widoczny jest parametr Actu Fuel Adm z jego wartościami chwilowymi, oraz 7 innych wybranych parametrów (reprezentowane wykresy różnymi barwami) - NORIS [100]

Wspierane są grafiką tych układów jako jednokreskowe schematy mnemoniczne obrazujące obieg kontrolowanego podsystemu co ma ułatwić zlokalizowanie aktualnie zaistniałego zakłócenia w pracy wyszczególnionego parametru. Wprowadzane funkcje rejestracji trendów prezentowanych w formie wykresów służą do szybkiej oceny tendencji zachodzącego zużycia wyszczególnionego mechanizmu, jak również wspierają planowanie obsługi tych mechanizmów.

Głównym celem instalowania tych układów, obejmujących kontrolę pracy zespołu SN, oraz systemów wspomagających (Task Asystent, Maintenance Report System (MRS), Consberg, TM Master V2) było [3, 19, 42, 76, 97, 98, 99, 100, 102, 103]:

- zwiększenie efektywności eksploatacji SN,
- zwiększenia bezpieczeństwa zespołu napędowego statku,
- efektywniejsze planowanie obsługi technicznych,
- efektywniejszą gospodarkę częściami zapasowymi.

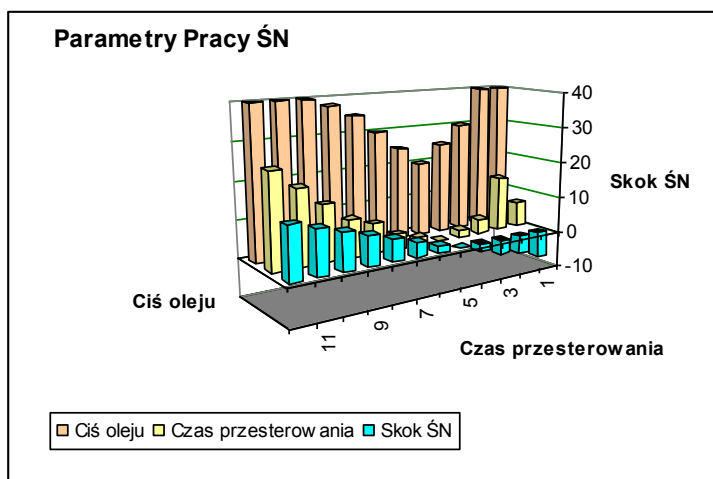
2.4 Przydatność praktyczna aktualnie stosowanych systemów diagnozujących

Nadzór pracy śrub nastawnych w układzie monitoringu ciągłego praktycznie na statkach nie jest stosowany. Ogranicza się on zazwyczaj do pomiaru i kontroli wybranych parametrów pracy mediów roboczych, jak np. ciśnienia oleju roboczego, ciśnienia powietrza sterującego, stabilizacji prądu w układzie sterująco-kontrolnym. Pozycja osiągniętych nastaw skoku *SN* jest reprezentowana przez wskaźniki pneumatyczne (manometry) bądź wskaźniki elektryczne (woltomierze) oraz mechaniczne wskaźniki sprzężenia zwrotnego. Reprezentują one rzeczywistą wartość osiągniętego skoku *SN*. Brak jest tu informacji o zgodności osiągniętej wartości skoku *SN* z wartością zadanego skoku. Informacja taka powinna być przedstawiona w systemie nadzoru pracy *SN* jako niezgodność alarmowa, zależnie od wartości uchybu pomiędzy zadanym skokiem a rzeczywiście osiągniętym. Również wartość czasu, jaki jest wymagany do zmiany nastaw pomiędzy poszczególnymi pozycjami manewrowymi skoku *SN*, nie jest monitorowana, a stanowiłaby dodatkową informację diagnostyczną o stanie technicznym tego zespołu. W praktyce wartość uchybu wybranej nastawy skoku *SN* dochodzi do 10% maksymalnego konstrukcyjnego skoku *SN*. Wymagane przedziały czasu dla przesterowania skoku w zakresie nastaw manewrowych zawierają się w granicach 4 – 7 sek [17, 21, 49,]. Tak więc i ta informacja mogłaby być wykorzystana przez operatora do diagnozowania stanu technicznego *SN*. Stosowane systemy kontroli pracy, a właściwie kontroli parametrów mediów roboczych, nie obejmują również kontroli zawartości wody w oleju roboczym, jak np. „Water Monitoring System” (*WMS*), który jest instalowany w obiegach wirowania olejów silnikowych. Taka informacja byłaby przydatną w ocenie szczelności układu oleju roboczego i smarującego, co w konsekwencji stanowiłoby ochronę zespołu roboczego *SN* przed jej degradacją wskutek korozyjnego działania wody morskiej, oraz dawałaby podstawę do oceny stopnia zdatności tego zespołu do dalszej pracy. W przypadku wycieku oleju do wody zaburtowej, system (*WMS*) chroniłby również środowisko naturalne przed zanieczyszczeniami olejowymi, a załogę i armatora statku przed karami finansowymi z tego tytułu wynikającymi. A zatem systemy diagnostyczne *SN* mogą i są bardzo przydatne dla służb armatorskich z uwagi na tworzenie baz danych o stanie technicznym mechanizmów oraz zapasach magazynowych. Planowanie obsługi okresowych, remontów stocznioowych, czy ocena ogólna o sprawności napędowej statku w oparciu o takie systemy i bazę danych byłaby trafna i wiarygodna. Najistotniejszą jednak zaletą takich systemów powinno być wspomaganie w podjęciu decyzji eksploatacyjnych podczas pracy *SDN*. Wiele informacji diagnostycznych opracowywanych jest przez system na podstawie obliczeń, co daje właściwe wyniki tylko wtedy, gdy wprowadzane dane wejściowe są poprawne, których jednak weryfikacja w praktyce nie zawsze jest możliwa. Nie zawsze wiedza i doświadczenie operatora śrub nastawnych jest wystarczająca do właściwej interpretacji informacji diagnostycznej, którą system prezentuje na ekranie monitora. Ponieważ operator jest eksploatatorem, więc informacja diagnostyczna *SDG* winna być adekwatna do warunków użytkowania zespołu *SN* oraz rodzaju wiedzy użytkownika tego zespołu.

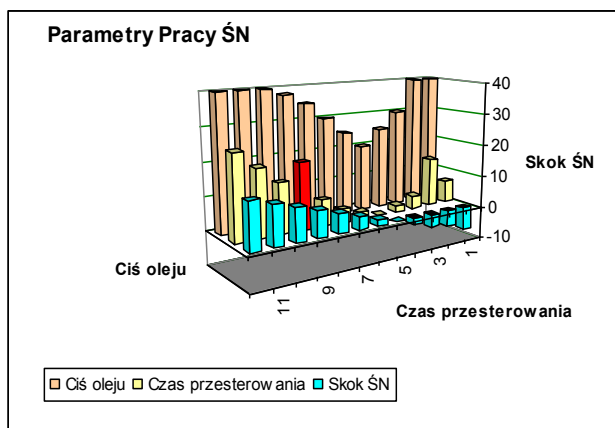
2.5 Uwagi i wnioski

W świetle powyższych rozważań wynika, że aktualnie stosowane *SDG* są systemami aplikacyjnymi dla konkretnych typów układów napędowych. Powszechne zastosowanie ich do obsługi innych układów napędowych, niż te, do których zostały stworzone, wymaga specjalnego przysposobienia zespołów *SN* i wyposażenie ich w czujniki pomiarowe. Zastosowanie takich czujników, jak piezoelektryczne, wibroakustyczne wymagać będzie sporych nakładów finansowych, natomiast na bazie podstawowego systemu pomiarów

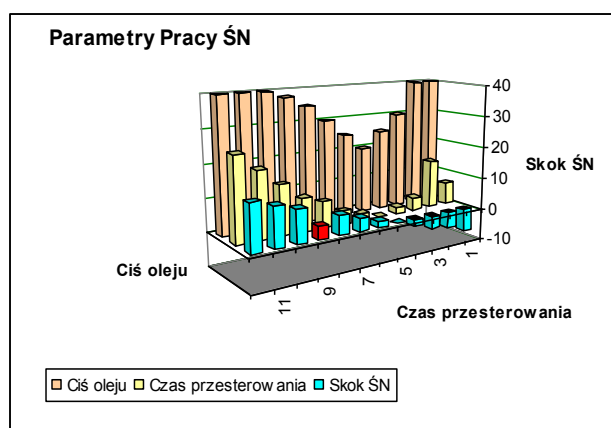
mediów roboczych można zbudować wykresy przestrzenne pola pracy SN , które mogą i będą stanowiły wizualizację stanu technicznego tego układu. Zależnie od przekroczenia wartości projektowych wyszczególniony parametr pracy reprezentowany będzie odmienną barwą wykresu, z zaznaczeniem aktualnej wartości tego parametru. Przykładowe wykresy związane z działaniem SN , opracowane przez autora w wyniku przeprowadzonych badań, zostały przedstawione na rys. 2.4 – 2.8.



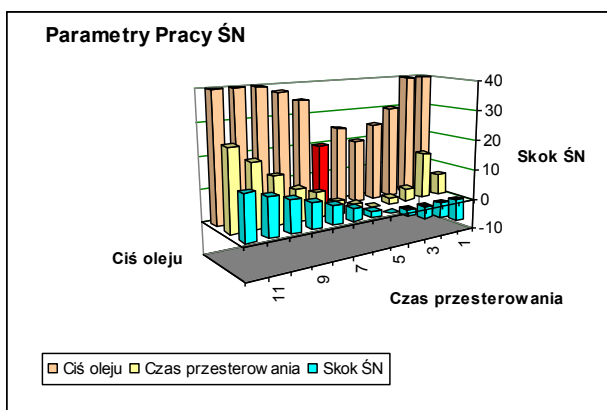
Rys. 2.4 Przykładowy wykres wartości parametrów pracy SN (ciśnienie oleju roboczego, czas przesterowania, skok) – stan normalnej pracy



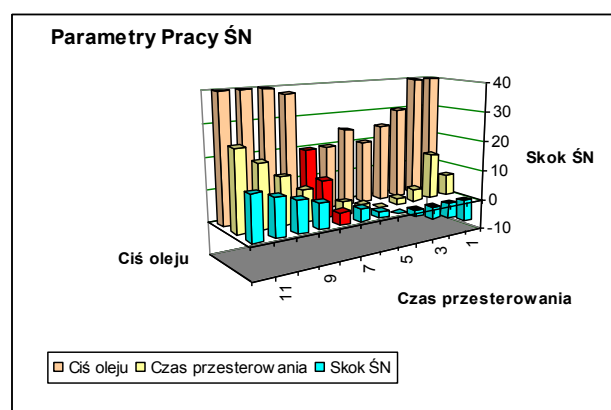
Rys. 2.5 Przykładowy wykres zakłóceń w czasie przesterowania SN



Rys. 2.6 Przykładowy wykres nie osiągnięcia zadanego skoku SN



Rys. 2.7 Przykładowy wykres zakłóceń w obiegu oleju roboczego SN



Rys. 2.8 Przykładowy wykres zakłóceń trzech podstawowych parametrów pracy SN

Taka wizualizacja pomierzonych parametrów przyspieszy i ułatwi interpretację zaistniałej częściowej niezdatności (niesprawności) zespołu SN , co znacznie ułatwi podjęcie trafnej decyzji eksploatacyjnej.

Z powyższego wynika, że podstawowymi parametrami, które obrazują stan techniczny zespołu SN , są: ciśnienie oleju roboczego, skok śruby nastawnej oraz czas osiągnięcia zadanego skoku. Wszystkie one wynikają ze stopnia zdatności mechanizmów obsługujących ten zespół oraz jego szczelności, a więc i zużycia mechanicznego jego części. W takim przypadku można przyjąć je jako wartości podstawowe, bazowe i użyć do wyznaczenia jednej podstawowej informacji o stanie technicznym urządzenia, która określałaby stan SN . Zdefiniowana może być jako Zdatność Śruby Nastawnej (ZSN), a jednostką tej wielkości może być dzulo-sekunda [Js], (podobnie jak TBN – liczba zasadowa, w ocenie olejów smarowych SG).

Wyżej wymienione parametry pracy mogą przyjmować wartości pozwalające na określenie stanu technicznego SN . Do tych parametrów najczęściej należą:

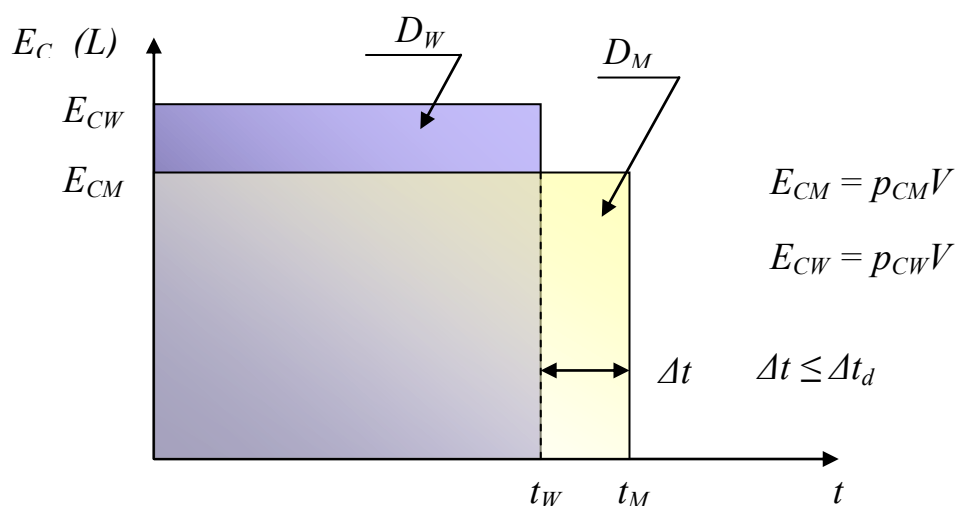
- ciśnienie oleju roboczego – pomiar w układzie oleju siłowego przez manometry,
- objętość komór roboczych w piaście SN – wynika z konstrukcji piastry,
- droga – skok SN , czyli ruch tłoka siłownika w piaście SN jest określony przez wskaźnik sprzężenia zwrotnego,
- czas – czas wykonania przesterowania skoku SN , jest prosty do kontroli, za pomocą wbudowanego w układy nadzoru pracy siłowni, modułu pomiaru czasu.

A zatem każdą taką wielkość można określić konkretną liczbą, która charakteryzuje stan energetyczny SN , czyli działania tego urządzenia i wyrazić zależnością:

$$D_M = Et_M \quad (2.1)$$

gdzie: D_M – działanie możliwe, t_M – czas (wymagany) po którym muszą być przesterowane płyty SN

Uwzględniając jednocześnie pracę (L) wykonaną przez SN oraz czas (t) wykonania tej pracy, można określić działanie SN i przedstawić w formie wykresu (rys. 2.9)



Rys. 2.9 Wykres działania SN w układzie praca – czas gdzie:

L – praca; E_C – energia ciśnienia; E_{CW} – energia ciśnienia wymagana; E_{CM} – energia ciśnienia możliwa; D_M – działanie możliwe; D_W – działanie wymagane; Js – dzulo-sekunda; p_{cw} – ciśnienie wymagane oleju roboczego; p_{cd} – ciśnienie możliwe (dostępne) oleju roboczego; t_w – czas (wymagany) po którym muszą być przesterowane płyty SN ; t_d – czas (dostępny) po którym mogą być przesterowane płyty SN ; Δt – zwłoka czasu przesterowania SN , Δt_d – dopuszczalna zwłoka czasu przesterowania SN

Przykładową przydatność przedstawionej interpretacji działania *SN* można przedstawić w oparciu o wcześniej przedstawione podstawowe parametry jej pracy jak: (ciśnienie oleju roboczego, skok *SN* i czas jej przesterowania)

Przesterowanie *SN* następuje w czasie posuwistego ruchu tłoka mechanizmu zmiany skoku śruby (*MZSS*), który wprawiając w ruch mechanizm obrotu skrzydeł (*MOS*) powoduje obrót skrzydła względem piasty wokół własnej osi. Przesterowanie to zapewnia odpowiednie ciśnienie (p_r) oleju roboczego, działającego na powierzchnię (F_{it}) tego tłoka, od jego strony rufowej (F_{it1}) (ruch naprzód) lub dziobowej (F_{it2}) (ruch wstecz), w zależności od wybranego kierunku przesterowania. Wymagane ciśnienie p_r oleju roboczego osiągnięte jest za pomocą pompy zainstalowanej w podsystemie hydraulicznym *SN*. Siła wymuszająca ruch tłoka roboczego *MOS* jest określona przez pole powierzchni aktywnej tego tłoka (F_{it1} lub F_{it2}), oraz działającego na te powierzchnie ciśnienie p_r oleju roboczego. W tym przypadku jedyną zmienną (w tej interpretacji) jest ciśnienie p_r oleju roboczego, gdyż elementy konstrukcyjne piasty *SN* są określone jednoznacznie, co wynika z fazy projektowania i wytworzenia *MOS*. A zatem powierzchnie te można przyjąć jako niezmiennie w całym okresie użytkowania *SN*, czyli $F_{it} = idem$.

Manewrowość statku, jego prędkość manewrowa i jazda morska, określona została już w fazie projektowania i wyrażona za pomocą kąta obrotu skrzydeł *SN*, zależnie od pozycji nastawy zadajnika skoku tej śruby.

Osiągnięta wartość ciśnienia oleju roboczego i ustalona nastawa zadanego skoku śruby, oraz czas jej osiągnięcia jednoznacznie określają stan techniczny tej śruby. Zatem parametry te są parametrami określonymi w fazie projektowania i wytwarzania, jako wartości wyjściowe, i potwierdzone podczas prób morskich statku, przed wprowadzeniem go do eksploatacji.

Wobec tego porównanie pomierzonych wartości rzeczywistych tych parametrów pracy *SN*, mierzonych w czasie jej użytkowania, z wartościami wyjściowymi, które zostały określone w fazie projektowania, umożliwia określenie stopnia zużycia *SN* i może stanowić podstawę do określenia jej stanu technicznego zakwalifikowania do jednej z klas stanów a mianowicie: stanu pełnej zdadności (s_1) lub stanu częściowej zdadności (s_2), bądź stanu niezdadności (s_3). Zastosowanie pomierzonych w czasie użytkowania *SN* wartości wspomnianych parametrów do obliczenia jej działania, umożliwia obliczenie działania możliwego (D_M) tej śruby. Natomiast zastosowanie projektowych wartości wspomnianych parametrów do obliczenia działania *SN* umożliwia obliczenie działania wymaganego (D_W). Oba rodzaje działania będą wtedy określone w formie liczby z jednostką miary [dżulosekunda].

Zatem działanie *SN* może być wyrażone zależnością

$$D_M = p_r \cdot F_{it} \cdot s_p \cdot t_{rt} \quad [\text{Js}] \quad (2.2)$$

gdzie:

p_r – ciśnienie robocze możliwe (rzeczywiste) oleju roboczego [Pa], F_{it} – powierzchnia aktualna tłoka [m^2], s_p – droga tłoka [m], t_{rt} – czas możliwy (rzeczywisty) przesterowania tłoka [s].

Natomiast działanie wymagane *SN* może być wyrażone wzorem:

$$D_W = p_p \cdot F_{ptl} \cdot s_p \cdot t_{ptl} \quad [\text{Js}] \quad (2.3)$$

gdzie:

p_p – ciśnienie projektowe oleju roboczego [Pa], F_{ptl} – powierzchnia projektowa tłoka [m^2], s_p – droga tłoka [m], t_{ptl} – czas możliwy (rzeczywisty) przesterowania tłoka przyjęty w projekcie [s].

Zużycie tłoka i cylindra *MZSS* może spowodować tak duże przecieki oleju z jednej przestrzeni cylindra wspomnianego *MZSS* do przeciwnej, że może się to ujawnić:

- znacznym spadkiem ciśnienia roboczego oleju,
- znacznym wzrostem czasu przesterowania SN .

To sprawi, że przy wymagany czasie przesterowania skrzydeł SN , jej działanie możliwe (D_M) może być mniejsze od działania wymaganego (D_W).

Można ten fakt wykazać na przykładzie badanej SN , która została opisana w załączniku nr1 dołączonym do tej pracy:

- ciśnienie oleju roboczego $p_r=7$ MPa, przy stanie pełnej zdatności (s_1) SN
- ciśnienie oleju roboczego $p_r=6$ MPa, przy stanie częściowej zdatności (s_2) SN
- przestrzeń robocza $V_r=F_{it} \cdot s_p=0,22$ [m²] $\cdot 0,2$ [m]= $0,044$ [m³],
- wymagany (w danych warunkach) czas przesterowania SN $t_{rtt}=7$ [s],
- maksymalny czas przesterowania SN $t_{rtt}=14$ [s]

W takim przypadku, gdy SN znajduje się w s_1 :

$$D_M = p_r \cdot F_{it} \cdot s_p \cdot t_{rtt} = 7 \cdot 0,044 \cdot 7 = 2.156 \text{ [MJ]}_s$$

Natomiast, gdy SN znajduje się w s_2 :

$$D_M = p_r \cdot F_{it} \cdot s_p \cdot t_{rtt} = 6 \cdot 0,044 \cdot 7 = 1,848 \text{ [MJ]}_s$$

Można przyjąć, że stan s_2 jest wtedy, gdy $p_r < 6,17$ MPa np., gdy zostanie zarejestrowane ciśnienie $p_r = 6,16$ MPa.

W przypadku, gdy do wykonania zadania, polegającego na przesterowaniu skrzydeł śruby nastawnej wystarczy, jeżeli $D_W = 1,9$ [MJ]_s, to oznacza, że do osiągnięcia czasu $t_{rtt} = 7$ s wystarczy ciśnienie $p_r = 6,17$ MPa. Uzyskanie takiego działania przez SN o $p_r = 6,0$ MPa jest możliwe dopiero po upływie czasu $t_{rtt} = 7,2$ s. Jeżeli ciśnienie p_r zmniejszy się do 5,5 MPa, przesterowanie SN jest możliwe dopiero po upływie $t_{rtt} = 7,8$ s. W przypadku, gdy czas przesterowania skrzydeł SN może być nawet równy 10 s, to dla $D_W = 1,9$ MJ_s i $V_r=0,044$ m³ ciśnienie p_r może być równe 4,3 MPa ($p_r = 4,3$ MPa).

Z przedstawionych rozważań wynika, że przy określonym zdefiniowanym ciśnieniu p_r oraz czasie t_{rtt} to samo działanie wymagane (działanie o tej samej wartości) oznaczane jako D_W może być osiągnięte przy mniejszym ciśnieniu p_r oraz większym czasie t_{rtt} bądź odpowiednio większym ciśnieniu p_r oraz krótszym czasie t_{rtt} .

Procedury przygotowania siłowni okrętowej do manewrów a następnie jazdy morskiej, wymagają sprawdzenia stanu ruchowego SN poprzez wcześniejsze uruchomienie pompy oleju roboczego, i po osiągnięciu przez olej roboczy wymaganej temperatury (zgodnie z wymogami DTR 40-50 C^o), sprawdza się osiągnięte ciśnienie oleju roboczego, przeprowadza się przesterowanie SN , (w nomenklaturze statkowej zwane „obracaniem mechanizmów”). Dokonuje się to sterując SN z pozycji STOP \rightarrow CN \rightarrow CW \rightarrow STOP ze stanowiska w CMK a następnie z mostkowego stanowiska manewrowego. W tej fazie przygotowania SN do pracy, operator nie posiada pełnej informacji o jej stanie (s_1 , s_2), a jedynie może stwierdzić jej stan ruchowy podczas postoju statku.

A zatem, w oparciu o wyżej przeprowadzone rozważania, jest możliwe określenie stanu technicznego SN , już podczas przygotowania jej do pracy, poprzez określenie jej zdatności wyrażoną liczbą której miano jest dziesiętna sekunda [Js].

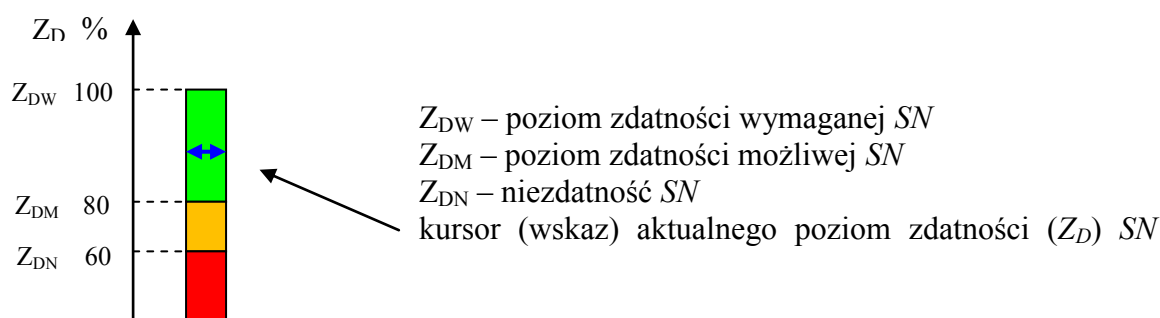
Liczba tak określona, mogłaby być nazywana Z_D (poziom zdatność śruby nastawnej), ujmującą w sobie Z_{DN} (poziom zdatność naprzód) oraz Z_{DW} (poziom zdatność wstecz). A zatem może to być liczba określająca aktualny stan techniczny SN .

Uwzględniając akceptowalną niedokładność pomiarową, oraz określony, dopuszczalny uchyb wartości pomierzonych parametrów, w odniesieniu do wartości projektowych,

wyszczególnionych parametrów, z wystarczającą dokładnością dla celów praktycznych, można przyjąć konkretny przedział procentowy, określający aktualny stan techniczny tej *SN*.

Tak interpretowany procentowy poziom zdatności (Z_D) *SN*, ujmowałaby w sobie każdą zmianę wartości ciśnienia oleju roboczego, wydłużenie czasu przesterowania tej śruby. Aktualny poziom zdatności (Z_D) prezentowany byłby, na wykresie pola pracy *SN*, kursorem znajdującym się bądź to w polu uznanym za dopuszczalne pole pracy *SN*, bądź w polu uznanym za możliwe lub niedopuszczalne pole pracy *SN*.

Wizualizacja, tak określonego przedziału zdatności *SN* może być przedstawiona np. w formie diagramu słupkowego, z jednoczesnym określeniem wartości granicznych. Osiągnięte wartości graniczne winny być sygnalizowane alarmem dźwiękowym, oraz zmianą koloru diagramu ale tylko w zakresie poza wartościami granicznymi. Przykładowy diagram opracowany przez autora został przedstawiony na rys. 2.10.



Rys. 2.10. Przykładowy diagram sygnalizacji stanu technicznego *SN*

W celu szybszej / łatwiejszej oceny, przez operatora *SN*, jej stanu technicznego, a tym samym ułatwienie podjęcia adekwatnej decyzji eksploatacyjnej, można przedziały te określić wartościami procentowymi, z zaznaczeniem ich wartości granicznych:

s_1 - przedział 100% → 80 % ; s_2 - przedział 79% → 60 %; s_3 - przedział 59%→0%.

Jednakże w rzeczywistości problem ten jest znacznie bardziej złożony, wymaga uwzględnienia wielu czynników eksploatacyjnych wpływających na pracę i stan techniczny tego mechanizmu. Współczesne metody zbierania trafnych bądź wiarygodnych informacji diagnostycznych, a w tym możliwości rozwiązań technicznych, koszt ich eksploatacji, wymagają od operatora wysokich kwalifikacji. Złożoność konstrukcyjna *SDG* rośnie bardzo szybko, co skutkować może wzrostem ilości możliwych nieprawidłowości w ich działaniu, dlatego najprostsza prezentacja zagadnienia diagnostyki, czyli modelu diagnostycznego, popartego metodami wizualizacyjnymi, w znacznym stopniu przyczyni się do wzrostu bezpieczeństwa eksploatacyjnego statku. Ponadto wraz z rozwojem śrub nastawnych jako *SDN* konieczne jest prowadzenie prac udoskonalających *SDG*, które to wpływają na racjonalną eksploatację *SN*, a w efekcie na sprawność układu napędowego statku. Dokonana analiza przydatności wymienionych modeli diagnostycznych *SDG* różnych firm, oraz proponowane rozwiązanie opisanie jedną liczbą możliwości działania *SN*, wskazują na trafność prowadzenia rozważań w tej pracy na temat zastosowania oraz znaczenia diagnostyki w procesie identyfikacji stanu technicznego *SN* [1, 2, 5, 26, 27, 28, 29, 54, 72].

Rozdział III

Znaczenie diagnostyki w eksploatacji śrub nastawnych

3.1 Uwagi wstępne

Decyzyjne sterowanie procesem eksploatacji śrub nastawnych jest jednym z najistotniejszych i najtrudniejszych problemów eksploatacji tego rodzaju pędników. Wynika to z tego, że sterowanie takie realizowane jest w stochastycznej sytuacji decyzyjnej. W tej sytuacji, przy podejmowaniu decyzji powinno być uwzględniane ryzyko statystyczne, którego oszacowaniem jest prawdopodobieństwo podjęcia błędnej decyzji. Taka decyzja może powstać wskutek niemożności precyzyjnego oszacowania nieznanymi parametrów rozkładów zmiennych losowych, które są stanami procesu eksploatacji śrub nastawnych, a także braku możliwości opracowania pełnej i wystarczającej wiarygodnej diagnozy o ich stanie technicznym. Racjonalne sterowanie tym procesem wymaga ponadto opracowania stochastycznych modeli decyzyjnych dla potrzeb sterowania. Do opracowania takich modeli może być zastosowana teoria decyzyjnych (sterowanych) procesów semimarkowskich bądź statystyczna teoria podejmowania decyzji [21, 24, 25, 28, 39, 51, 54, 58]. W wyniku zastosowania tych teorii można skonstruować modele decyzyjne, umożliwiające podejmowanie optymalnych decyzji eksploatacyjnych. Kryterium optymalizacyjnym może być: wartość oczekiwana kosztów eksploatacji, wartość oczekiwana zysku bądź dochodu oraz współczynnik gotowości do obciążenia śruby nastawnej zgodnie z potrzebami w określonych warunkach i dowolnej chwili czasu eksploatacji podczas rejsu statku.

Zastosowanie teorii decyzyjnych (sterowanych) procesów semimarkowskich wymaga opracowania semimarkowskiego modelu rzeczywistego procesu eksploatacji śrub napędowych o skoku nastawnym, a więc modelu w formie procesu semimarkowskiego oraz znajomości kosztów przebywania tego procesu w poszczególnych stanach i kosztów związanych ze zmianą dowolnego jego stanu, w którym się on znajduje, na inny. Taki model dla silników głównych został przedstawiony w publikacji [58]. Podobny model, lecz o innej interpretacji stanów tego procesu, można opracować dla śrub nastawnych. Z kolei zastosowanie statystycznej teorii decyzyjnych wymaga opracowania jedynie procesu zmian stanów technicznych śrub nastawnych oraz uwzględnienia konsekwencji podjęcia danej decyzji. Obie wspomniane teorie są przydatne, z tym, że teoria decyzyjnych procesów semimarkowskich jest trudniejsza do zastosowania [26, 29, 40].

3.2 Śruba napędowa o skoku nastawnym jako obiekt sterowania

Funkcjonowaniu śrub o skoku nastawnym w dowolnym systemie eksploatacji, podobnie jak w przypadku śrub o skoku nienastawnym (śrub o skoku stałym), towarzyszą różne procesy fizyczne i chemiczne zarówno uwarunkowane, jak też niuwarunkowane tym funkcjonowaniem. Procesy te zachodzą zarówno w czasie użytkowania jak również obsługi. Wszystkie te procesy wymagają sterowania [26, 30, 36]. Przebieg tego sterowania zależy przede wszystkim od różnych informacji uzyskanych podczas realizacji dwóch wzajemnie sprzężonych procesów: badawczego i decyzyjnego. Do najistotniejszych informacji należą te, które dotyczą procesu aktywnego użytkowania (działania, pracy) śruby o skoku nastawnym. W czasie pracy (działania) śruby w wyniku doprowadzenia do niej energii wytworzonej w silniku napędu głównego zapewniony jest ruch statków morskich. Transformacja energii doprowadzonej do śruby nastawnej generuje i wymusza różne procesy wewnętrzne, między innymi takie jak: obracanie skrzydeł względem piasty, przemieszczenie tłoka siłownika w tulei cylindrycznej MZSS, przetłaczanie oleju przez pompę i dostarczania

go do siłownika i piasty, a także procesy: mikrosprężystych odkształceń warstw wierzchnich elementów układów tribologicznych, termiczny (wynikający z przenoszenia energii cieplnej), tarcia, korozji, erozji, kawitacji, zużycia, wibroakustycznych itd. Procesy te wywołują procesy wyjściowe śruby nastawnej, które można opisać mierzalnymi wielkościami nazywanymi parametrami wyjściowymi [17, 23, 26, 28, 58].

Warunki wewnętrzne funkcjonowania śrub nastawnych zależą od ich stanu technicznego i fizykochemicznych czynników energetycznych (olejów), które zapewniają działanie tych śrub. Z kolei stany techniczne tego rodzaju śrub napędowych są określone przez wartości parametrów ich struktury konstrukcyjnej, których zmiany są przyczynami zmian wartości parametrów wyjściowych. Wartości tych parametrów odzwierciedlają wartości parametrów struktury konstrukcyjnej śrub. Zatem zapewnienie właściwych przebiegów procesów zachodzących w czasie ich pracy wymaga odpowiedniego sterowania wartościami parametrów struktury konstrukcyjnej każdej śruby nastawnej, które powinno być skorelowane z wartościami parametrów wspomnianych procesów zewnętrznych. Ten rodzaj sterowania można nazwać sterowaniem wewnętrznym danej śruby nastawnej. W tym sensie można rozpatrywać sterowanie dowolną śrubą nastawną jako [3, 17, 28, 29, 55, 58, 63]:

- sterowanie procesami przygotowania do działania, uruchomienia i zatrzymania działania śruby,
- sterowanie położeniem skrzydeł śruby i utrzymanie zadanego ich położenia,
- utrzymanie skrzydeł śruby w zadanym położeniu,
- kontrolowanie obrotu skrzydeł i przekazanie wyników do zdalnego stanowiska manewrowego,
- regulację zasilania układu hydraulicznego olejem,
- regulację zaworu bezpieczeństwa,
- sterowanie procesem zmiany położenia śruby z położenia „naprzód” na „wstecz”,
- regulację zasilania układu sterowania sprężonym powietrzem,
- kontrola wartości prądowych silników elektrycznych, w które są wyposażone zespoły śruby nastawnej,
- sterowanie awaryjne śruby w przypadku uszkodzenia systemu hydraulicznego.

Sterowanie procesami przygotowania do działania, uruchomienia i zatrzymania działania śruby, zmiany położenia skrzydeł śruby i utrzymania zadanego ich położenia, utrzymywania skrzydeł śruby w zadanym położeniu, kontrolowania obrotu skrzydeł i przekazywania wyników do zdalnego stanowiska manewrowego realizowane jest w czasie użytkowania aktywnego śruby (w czasie jej pracy, działania). Te rodzaje sterowania wewnętrznego śrubami nastawnymi są realizowane przez systemy automatycznego sterowania. Pozostałe rodzaje sterowania, jak regulacja zaworu bezpieczeństwa, regulacja zasilania układu hydraulicznego olejem itp. są realizowane w czasie wykonywania odpowiednich obsług technicznych, gdy śruba znajduje się w systemie obsługowym.

Takie rodzaje sterowania, jak: regulacja zaworu bezpieczeństwa, regulacja zasilania układu hydraulicznego olejem, itp. wymagają podjęcia decyzji o wycofaniu śruby z systemu użytkowania i skierowania jej do systemu obsługiwanego. Decyzje takie muszą być także podejmowane wtedy, gdy zachodzi potrzeba wymiany elementu (np. skrzydła śruby) lub podzespołu (np. suwaka sterującego). Po zakończeniu prac związanych z obsługą techniczną niezbędna jest decyzja o ponownym wprowadzeniu śruby do systemu użytkowania. Można więc przejście śruby z systemu użytkowania do systemu obsługiwanego i odwrotnie, a także przejścia między wyróżnionymi stanami użytkowania i stanami obsługiwanego śruby, traktować jako wynik sterowania procesem zmian stanów eksploatacyjnych. Ten rodzaj sterowania można nazwać sterowaniem zewnętrznym śruby [26, 58]. Od właściwości

sterowania funkcjonowaniem śrub nastawnych zależy przebieg zmian ich stanu technicznego i odwrotnie, stan techniczny tych śrub wpływa na przebieg sterowania ich funkcjonowaniem.

Każde urządzenie śruby nastawnej, aby zachowało w założonym przedziale czasu eksploatacji, tzn. czasu użytkowania efektywnego, stan pełnej zdadności, powinno i musi być diagnozowane. Zebrane wyniki badań diagnostycznych służą ocenie stanu technicznego całej śruby nastawnej lub jej wybranych i diagnozowanych podzespołów, jak np. mechanizmu zmiany skoku tej śruby. Oczywiście jest, iż diagnozowanie jest jednym z podstawowych warunków poprawnego użytkowania i sterowania procesem eksploatacji śruby nastawnej.

Śruba nastawna, jest złożonym obiektem technicznym, z ograniczoną dostępnością do jej podzespołów, wymaga więc szczególnie stałego dozoru w celu zapewnienia długotrwałej i niezawodnej eksploatacji. Śruba nastawna jest zespołem, który warunkuje ruch statku, a więc jego bezpieczeństwo.

Zespół śruby nastawnej w dowolnej chwili znajduje się w ściśle określonym stanie technicznym, a jego zmiana jest wynikiem zachodzących w nim, w czasie użytkowania, zużyciu powierzchniowemu, i objętościowemu. Intensywność tego procesu jest zależna od obciążeń, jakie działają na jego poszczególne elementy, i ich odporności na te działania, są to między innymi:

- zużycie tarciove w poszczególnych układach tribologicznych,
- erozja elementów układów tribologicznych,
- kawitacja przepływowa,
- korozja elektrochemiczna (a niekiedy chemiczna),
- stałe lub zmienne obciążenie cieplne,
- oddziaływanie środowiska pracy (falowanie, zanurzenie itp.)

Ponadto stopień zużycia zależy także od czasu użytkowania, jakości obsługi okresowych, stanu fizyko-chemicznego oleju roboczego i występujących ciśnień w układzie hydraulicznym śruby. Wynika z tego, że miarą stopnia zużycia śruby nie może być tylko jej średni czas pracy. W ocenie stopnia degradacji śruby należy brać pod uwagę jego uwarunkowania energetyczne, wyniki z działań środowiskowych jak i istotę pracy samej śruby. Do oceny stopnia zużycia służą zebrane dane w wyniku diagnozowania, na ich podstawie następuje opracowanie właściwej diagnozy, co z kolei służy podjęciu właściwej decyzji eksploatacyjnej, w celu utrzymania zdadności technicznej śruby.

Ponieważ warunki pracy i oddziaływanie środowiska mają naturę losową, więc istotnym jest permanentny proces diagnozowania, w którym wykorzystuje się mierzalne wartości parametrów jego pracy, a w miejsce wartości trudno lub nie mierzalnych, stosuje się współczynniki charakteryzujące te wielkości. Wielkości mierzalne stanowią takie parametry, jak prędkość obrotowa śruby, drgania, czas wykonania poszczególnych zmian skoku śruby nastawnej pomiędzy wyszczególnionymi pozycjami, temperatura i ciśnienie oleju roboczego, prędkość statku. Służą do tego celu tachometr (pomiar prędkości obrotowej wału śrubowego), log, manometry, termometry, czujniki drgań, czasomierz, wskaźnik przemieszczenia liniowego. Ponieważ wartość skoku śruby nastawnej nie jest możliwa do pomiarzenia podczas eksploatacji, zastosować można pomiar pośredni, polegający na pomiarze położenia wskaźnika serwomechanizmu zmiany skoku śruby, który jest wielkością wprost proporcjonalną do rzeczywistego skoku śruby. Pomierzone wartości mogą służyć do utworzenia wykresu przestrzennego pola pracy śruby nastawnej, oraz mogą, w przypadku pomiarów ciągłych, stanowić obraz trendów zachodzących zmian w stanie technicznym zespołu. Tak więc istnieją możliwości diagnozowania śrub o skoku nastawnym w procesie ich eksploatacji. Aby cel ten zrealizować, należy zbudować model diagnostyczny, który będzie przydatny do sterowania procesem eksploatacji, oraz może służyć zbudowaniu wykresu przestrzennego parametrów pracy śruby o nastawnym skoku, jako obraz graficzny stanu w danej chwili jej użytkowania.

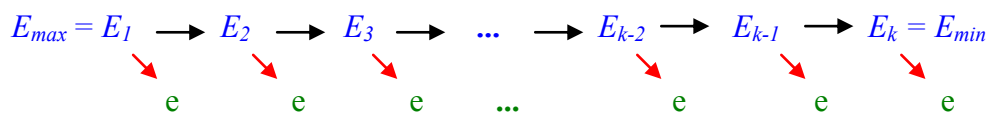
Współczesne przyrządy (urządzenia) pomiarowe stwarzają możliwości pozyskiwania nowych parametrów, jak i dokonanie korelacji z parametrami już mierzonymi. Takie przetwarzanie danych za pomocą systemów komputerowych pełni rolę doradczą w procesie podejmowania decyzji, informacyjną o aktualnym stanie technicznym oraz służy diagnozie zespołu śruby o nastawnym skoku. Są to niezbędne informacje do podjęcia decyzji o utrzymaniu śruby nastawnej w systemie użytkowania, lub jej wyłączeniu z użytkowania i przekazania do obsługi. Służyć może także do określenia zakresu i szybkości zachodzącej degradacji własności śruby. Poprzez analizę pomierzonych parametrów, oraz ich położenie względem pola pracy śruby nastawnej, można wnioskować o bieżących jak i mogących zajść w przyszłości zmianach stanu technicznego, a także określić zakres czynności obsługowych, co przy odpowiednio wcześniej podjętej decyzji eksploatacyjnej uchronić może układ napędowy statku przed rozległą awarią. Reprezentacja na wykresie wybranych i mierzonych parametrów daje obraz stanu pracy śruby nastawnej.

3.3 Stany techniczne śruby nastawnej

3.3.1 Opis stanów technicznych śruby nastawnej

Statek, jak już wcześniej wspomniano, jest złożonym obiektem technicznym, który działa w odosobnionych warunkach, tzn. bez dostępności serwisowej przez większość czasu jego użytkowania aktywnego. Z tego też powodu dla bezpieczeństwa statku wymagana jest wysoka niezawodność w działaniu oraz, co jest bardzo istotne, długi czas jego bezawaryjnego użytkowania między kolejnymi planowanymi obsługami, czyli rozpatrując zagadnienie stanu technicznego śruby napędowej o skoku nastawnym, należy brać pod uwagę także dostępność tego urządzenia do działania przy jego zdolności użytkowej.

Każde urządzenie techniczne od chwili jego wytworzenia jest określone parametrami jego struktury, charakteryzują one jego stan techniczny. Stan ten zależny jest od własności materiałów użytych do jego konstruowania, dokładności montażu, luzów, oraz warunków użytkowania. Czyli można stwierdzić iż stan techniczny urządzenia jest zbiorem cech technicznych jego struktury konstrukcyjnej umożliwiającej mu działanie (pracę) zgodnie z przeznaczeniem, do którego zostało przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania. Śruby nastawne jako takie urządzenia są systemami otwartymi, w których występuje przepływ masy, energii i informacji. A więc są to systemy, które przekształcają energię wraz z towarzyszącym jej wewnętrznym i zewnętrznym rozproszeniem. We wszystkich procesach zachodzących w śrubach nastawnych, zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, podczas jej użytkowania zachodzi dyssypacja energii w czasie, która jest procesem nieodwracalnym. Taki proces zachodzi wskutek istnienia w nich wymuszeń spowodowanych bezpośrednim lub pośrednim wzajemnym oddziaływaniem energetycznym elementów śruby i środowiska jej pracy. Wskutek takiego procesu rozproszenia energii wszystkie śruby nastawne będą działały z upływem czasu, będą działały z coraz mniejszą sprawnością energetyczną, będą miały coraz mniejszą zdolność przetwarzania energii. Energia przetwarzana jak i przenoszona przez te śruby powoduje degradację ich struktury konstrukcyjnej, zatem stan energetyczny tych śrub nastawnych jednoznacznie charakteryzuje ich stan techniczny. W działaniu śruby nastawnej oraz każdego jej podzespołu, nie tylko istotny jest stan energetyczny, lecz również czas, jakim można dysponować użytkując śrubę, w którym ta energia może być zapewniona dla potrzeb działania tej śruby. Wobec tego ma sens rozpatrywanie działania, a tym samym opisu stanu technicznego śruby rozumianego jako wydatkowanie energii w określonym czasie. Możemy więc to zapisać w formie schematu zobrazowanego na rys. 3.0 [24, 30, 31, 58].



Rys.3.0 Schemat rozpraszania energii i jego skutki [31]:

E_i ($i=1, 2, \dots, k$) – energie określone w poszczególnych etapach spadków energii śruby w formie porcji (kwantów) e ; E_{min} – najmniejsza energia która może być przenoszona przez maszynę w chwili bliskiej jej uszkodzenia

Oznacza to, że z biegiem czasu użytkowania, śruba nastawna działać będzie z coraz mniejszą sprawnością energetyczną, co jest wynikiem pogarszania się jej stanu technicznego w miarę upływu czasu użytkowania. Jest to skutkiem bezpośredniego lub pośredniego wzajemnego oddziaływania energetycznego jej elementów, jak i oddziaływania środowiska, w którym pracuje. Tak więc energia przenoszona przez śrubę nastawną, oddziaływanie środowiska pracy, są czynnikami sprawczymi powodującymi degradację struktury technicznej, jest więc oczywiste, że zmiana tej energii podczas użytkowania charakteryzuje jej stan techniczny. Ponieważ istotnym jest także czas, którym możemy dysponować użytkując śrubę nastawną, dlatego zasadnym jest rozpatrywanie jej działania w takim ujęciu, które byłoby określone jednocześnie przez energię i czas, w którym ta energia umożliwia realizację określonego działania. Działanie to w przypadku śruby napędowej o skoku nastawnym polega na przenoszeniu energii doprowadzonej i nadaniu statkowi ruchu, zależnie od ustawienia skoku tejże śruby. W wyniku tego działania powstają obciążenia prowadzące do jej zużycia i w skrajnym przypadku uszkodzenia a nawet awarii. W praktyce istotnym jest, aby założona praca była wykonana w określonym czasie i była możliwie największa albo wykonana w możliwie najkrótszym czasie. Są to wartości założone w fazie projektowania i sprawdzane są ich realizacje w praktyce, stanowią one parametry pracy, uznane jako najkorzystniejsze, spełniające warunek pełnej zdatności śruby. Jeśli nie są one osiągnięte, w skutek zachodzącej degradacji struktury konstrukcyjnej śruby nastawnej w procesie jej użytkowania, uznaje się, że śruba nastawna jest w stanie częściowej zdatności, lub niezdatna do działania. Przenoszenie energii przez śrubę nastawną w określonym czasie stanowi jej działanie. Wobec tego działanie, gdy energia przetwarzana E nie ulega zmianie w przedziale czasu $[0, t]$, może być opisane zależnością [22, 23, 30, 31, 63]:

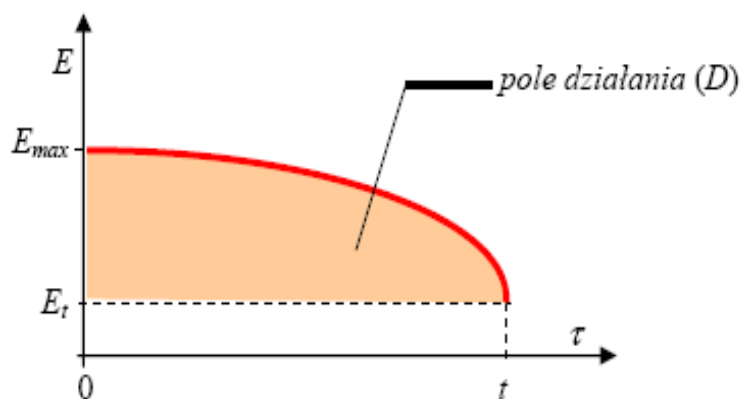
$$D = Et \quad (3.1)$$

Jeśli natomiast energia (E) ulega zmianie w czasie (t), to określenie działania $D = D(t)$ przyjmuje postać:

$$D = \int_0^t E(t)dt \quad (3.2)$$

gdzie: D – działanie; E – energia przenoszona przez śrubę, umożliwiającą realizację zadania; $[0, t]$ – czas przenoszenia energii E podczas działania.

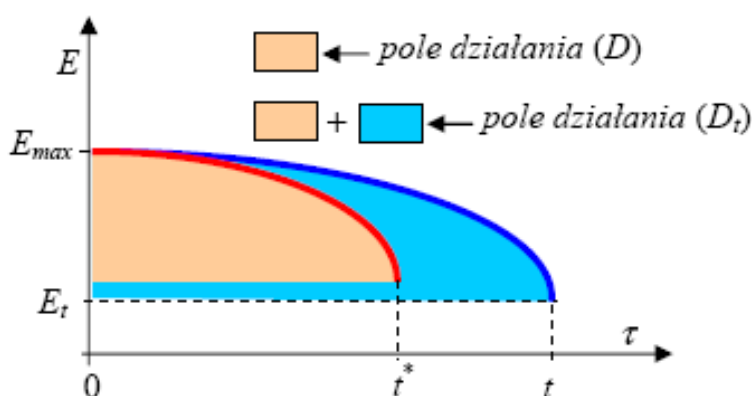
Tak interpretowane działanie śruby nastawnej zgodnie z zależnością (3.2) może być przedstawione w formie wykresu o współrzędnych „ $E - \tau$ ”, co obrazuje wykres na rys. 3.1.



Rys. 3.1 Przykładowy wykres działania [31]:

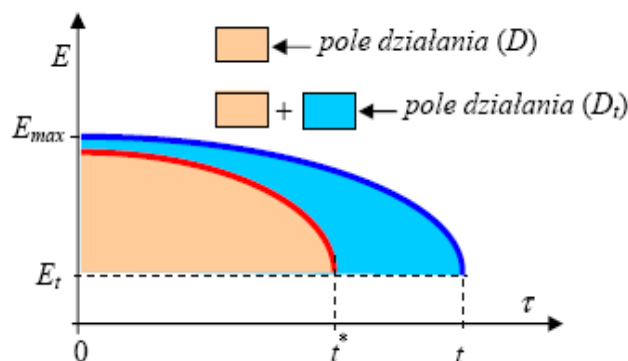
E – energia; E_{max} – energia maksymalna; E_t – energia w chwili t ; τ – czas

Z powyższego wynika, że, aby wyznaczyć pole działania, należy znać zależność funkcyjną energii (E) od czasu (t), a ponieważ działanie jest zależnością funkcyjną $D = f(E, t)$ możliwe jest także przedstawienie działania urządzenia w układzie współrzędnych „ D, E, t ”, ze względu na to, że działanie określa energię zużywaną do realizacji zadania, oczywistym więc jest, że działanie będzie nie tylko od zakresu możliwej zmiany energii lecz także od warunków, w których realizowane jest działanie. Wynika stąd, że w trudniejszych warunkach realizacji działania jego pole będzie większe, gdyż następuje większe rozproszenie energii podczas realizacji założonego zadania. Wobec tego różne pola działania będą reprezentacją różnych warunków tego działania, ponieważ działanie zależy od stanu technicznego śruby nastawnej, więc i pole działania zależy od stanu technicznego tej śruby. Tak więc jeśli pole działania D reprezentuje zużycie energii w przedziale czasu $[0, t^*]$, czyli czasu realizacji działania, a pole działania D_t reprezentuje zużycie energii w przedziale czasu $[0, t]$, to wykres tych pól działania będzie jak na rys. 3.2.



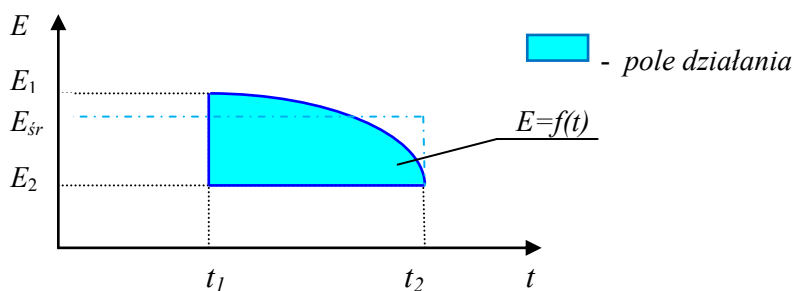
Rys. 3.2 Przykład różnych pól działania związanych z warunkami eksploatacji śruby nastawnej [31]:
 E – energia; E_{max} – energia w chwili t ; τ – czas; D – działanie do chwili t^* ; D_t – działanie do chwili t

Różne pola działania przedstawione na rys. 3.2 obrazują zużycie energii w czasie realizacji zadania w różnych warunkach zewnętrznych. A więc gdy śruba dysponować będzie mniejszą energią, to w tych samych warunkach zewnętrznych pole jej działania będzie mniejsze. Przypadek taki został zobrazowany graficznie na rys. 3.3.



Rys. 3.3 Przykład różnych wykresów działania związanych z różnymi stanami technicznymi SN [31]:
 E – energia; E_{max} – energia maksymalna; E_t – energia w chwili t ; τ – czas; D – działanie do chwili t^* ;
 D_t – działanie do chwili t

Na rys. 3.3 przedstawione są dwa przypadki działania, gdzie spełniony jest warunek $D_t > D$. Rys. 3.2 przedstawia przypadek pól działania wynikający z różnych warunków zewnętrznych przy takiej samej energii początkowej, natomiast rys. 3.3 przedstawia różne pola działania przy mniejszej energii początkowej działania D , wynikające z tego, że śruba nastawna dysponuje mniejszą energią wskutek jej zużycia, czyli oznacza to, że energia przed rozpoczęciem działania D_t była mniejsza od energii dotyczącej działania D . Działania przedstawione powyżej, opisane zależnością (3.2) i zobrazowane wykresami na rys. 3.1 ÷ 3.3 stanowią te przypadki, gdy rozpoczynają się one od stanu początkowego eksploatacji, ($t=0$) a więc gdy śruba jest nowa lub po obsłudze głównej, w wyniku której przywrócono jej pełne walory użytkowe bądź obsługi okresowej lub wymuszonej uszkodzeniem. Badanie działania jednak może też zachodzić w dowolnym przedziale $[t_1, t_2]$ czasu użytkowania śruby nastawnej, co przedstawiono na rys. 3.4



Rys. 3.4 Przykład wykresu działania w przedziale czasu $[t_1, t_2]$:
 E – energia; E_1 – energia w chwili (t_1) rozpoczęcia działania; E_2 – energia w chwili (t_2) zakończenia działania; t – czas

Pole działania zobrazowane na rys. 3.4 może być określone z zależności:

$$D = \int_{t_1}^{t_2} [f(t) - E_2] dt = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt - E_2(t_2 - t_1) \quad (3.3)$$

W przypadku założenia, że można wyznaczyć $E_{sr} = idem$ działanie będzie wyrażone wzorem:

$$D = \int_{t_1}^{t_2} E(t) dt = E_{sr} \int_{t_1}^{t_2} dt = E_{sr} t \Big|_{t_1}^{t_2} = E_{sr}(t_2 - t_1)$$

Z powyższego wynika, że działanie śruby nastawnej może być rozpatrywane dwojako, a mianowicie jako:

- działanie wymagane D_W , czyli takie, które jest niezbędne do wykonania zadania,
- działanie możliwe D_M , czyli takie, które może być zapewnione w wymaganym czasie, a więc gdy zachodzi warunek:

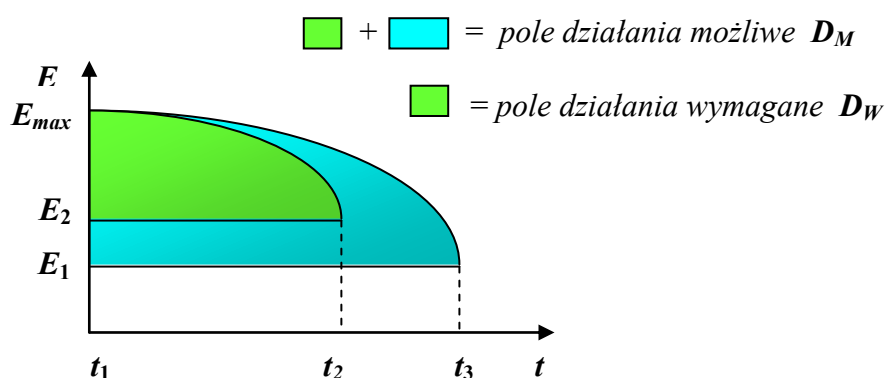
$$D_M \geq D_W \quad (3.4)$$

wówczas śruba nastawna jest w stanie zdatności, w przypadku przeciwnym, czyli warunek:

$$D_M \leq D_W \quad (3.5)$$

można uznać, że śruba nastawna jest w stanie niezdatności. Natomiast w przypadku, gdy nie wszystkie zadania muszą być wykonane w danym czasie, lecz tylko spełniające warunek (3.5), to można uznać, że śruba znajduje się w stanach pośrednich zdatności, czyli zdatności częściowej.

Pole działania możliwego D_M oraz wymaganego D_W można przedstawić na przykładowym wykresie jak na rys. 3.5

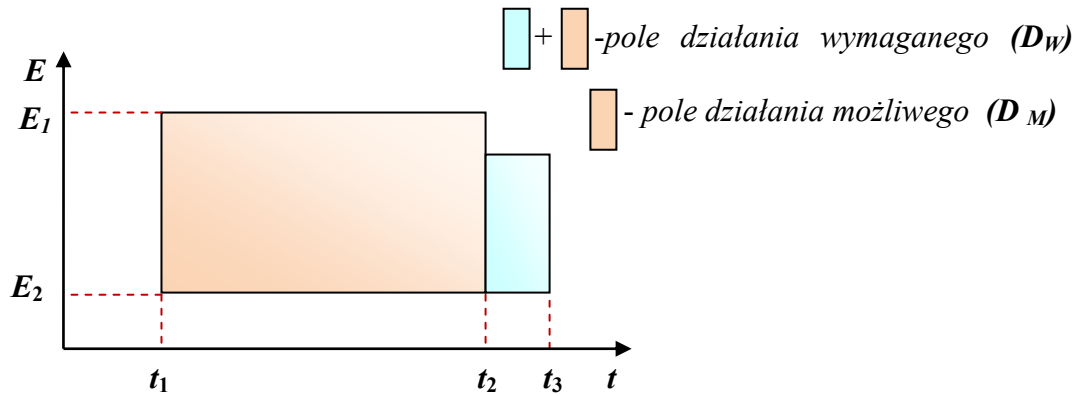


Rys.3.5 Przykład wykresu działania w przedziale czasu $[t_1, t_2]$ i $[t_1, t_3]$ [31]:

D_M – działanie do chwili t_3 ; D_W – działanie do chwili t_2 ; E_{max} – energia maksymalna; E_2 – energia w chwili t_2 ; E_1 – energia w chwili t_3 ; t – czas; t_1 – czas rozpoczęcia działania; t_2 – czas działania wymaganego; t_3 – czas działania możliwego

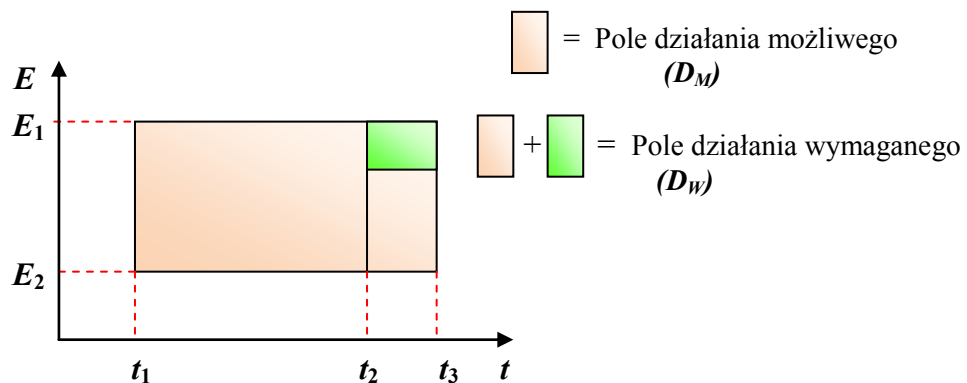
Tak więc o przydatności śruby nastawnej można by wnioskować na podstawie obliczenia wartości jej działania (3.1), które stanowiłaby wielkość fizyczna o jednostce miary określonej jako „dżulosekunda”. Ponadto inną formą oceny działania śruby może być porównanie jej pól działania wymaganego (D_W) i możliwego (D_M) rys 3.2. Wynika z tego oczywisty wniosek, że rozpatrywanie wspomnianego działania z uwzględnieniem obu jego rodzajów równoznaczne jest z badaniem zmian energii wymaganej (E_W), jaka jest potrzebna w czasie wymaganym (t_W) do wykonania danego zadania oraz energii możliwej (E_M), a więc, która może być dostarczona do napędu statku w czasie możliwym (t_M) przez śrubę zastosowaną do realizacji tego działania. Aby wyznaczyć pole działania, koniecznym jest znajomość zależności funkcyjnej energii i czasu, czyli $E = f(t)$. Korzystając z zależności (3.2) i (3.3), które umożliwiają wykonanie prostych wykresów działania wymaganego (D_W), można dokonać wstępnej oceny oraz uzyskać informację na temat przydatności eksploatacyjnej śruby do wykonania określonego zadania.

Można to zobrazować na prostych wykresach pola działania śruby, które przedstawione są na rys. 3.6 i rys 3.7



Rys. 3.6 Przykładowy wykres działania możliwego (D_M) i wymaganego (D_W) [31]:
 E – energia; t – czas; E_1 – energia przyporządkowana chwili t_1 ; E_2 – energia przyporządkowana chwili t_2

Na rys. 3.6 przedstawiono przypadek, gdy działanie możliwe $D=(E_1-E_2)(t_2-t_1)$ śruby, która działając, może dostarczyć energię E_1 – *idem*, niezbędną do wykonania określonego zadania w czasie t_1 , jednak w tym przypadku, zobrazowanym wykresem na rys. 3.6, do wykonanie zadania niezbędne jest działanie wymagane większe niż możliwe tzn. $D_M < D_W$ przy czym $D_W = E(t_3-t_1)$. Wynika z tego, że śruba nastawna nie zapewni wykonania zdania, i dlatego należy przed jego realizacją wykonać odpowiednią obsługę poszczególnych podzespołów tej śruby.



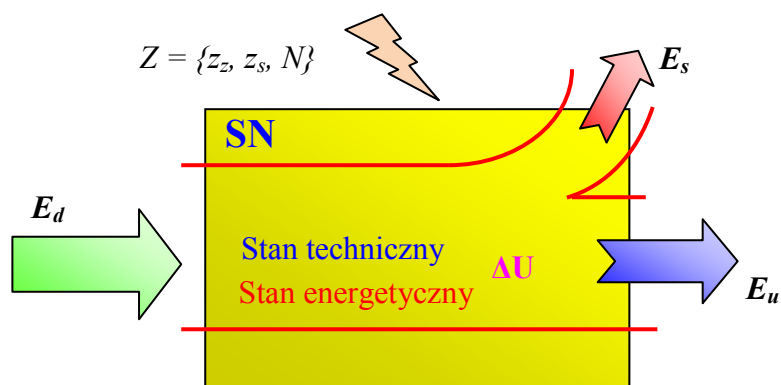
Rys. 3.7 Przykładowy wykres działania możliwego (D_M) i wymaganego (D_W) [31]:
 E – energia; t – czas; E_1 – energia przyporządkowana chwili t_1 , E_2 – energia przyporządkowana chwili t_2

Na rys. 3.7 przedstawiono taki przypadek pól działania D_M śruby nastawnej, gdy nie została wykonana obsługa wymagana, a tym samym nie nastąpiła pełna odnowa tej śruby, i wobec tego nadal istnieje nierówność $D_M < D_W$.

Opisane powyżej przypadki działania śruby nastawnej jako urządzenia energetycznego i zobrazowane na wykresach pól jej działania dotyczą przypadku, gdy istotne jest określenie energii bądź możliwego jej przesyłania w celu wykonania określonego zadania.

Wskutek zużycia, zmiany doprowadzanej do śruby energii bądź jej zużywania w czasie ruchu statku, będą przebiegały z coraz mniejszą sprawnością. Wynika z tego, że przy $E_{dp} = \text{idem}$ (energia doprowadzona) z upływem czasu będzie malała, natomiast E_{od} (energia odprowadzona) równoważna E_s (energia strat) będzie rosła, a więc malała E_u (energia użyteczna).

Utrzymanie więc warunku $E_u = idem$ wymagać będzie zwiększania E_d wraz z upływem czasu, jeśli to będzie możliwe. Tak więc zmniejszenie się energii użytecznej zależy od stanu technicznego urządzenia, jakim jest SN oraz występujących zakłóceń wpływających na jego pracę, co obrazuje rys. 3.8.



Rys.3.8 Schemat śruby nastawnej jako urządzenia energetycznego przetwarzającego energię: Z – zakłócenia; Z_z – zakłócenia zasilania; Z_s – zakłócenia sterowania; N – inne zakłócenia; E_d – energia doprowadzona; E_s – energia strat; E_u – energia użyteczna efektywna; ΔU – przyrost energii wewnętrznej

Jak już wspomniano proces użytkowania śruby nastawnej powoduje ciągłą zmianę jej struktury technicznej i podlega działaniom zarówno zależnym od operatora jak i niezależnym od niego. Wobec tego może być rozpatrywany zbiór jej stanów technicznych w danym przedziale czasu. Stan śruby w dowolnej chwili (t) jej eksploatacji zależy nie tylko od tej chwili, ale także od stanu technicznego w chwili początkowej ($t_0 < t$) oraz od działań eksploatacyjnych w przedziale $[t_0, t]$, więc także od przebiegu obciążeń śruby napędowej o skoku nastawnym w tym przedziale czasu. Ponieważ proces zmian stanu SN jako urządzenia technicznego jest stochastyczny, ciągły w stanach i czasie, mamy tu możliwość realizacji możliwych stanów technicznych jako nieskończony zbiór stanów technicznych śruby o skoku nastawnym. Rozpatrywanie wszystkich jej stanów technicznych nie ma uzasadnienia ekonomicznego jak i możliwości technicznej z uwagi na ograniczoną możliwość i dostępność pomiarów wybranych parametrów, jak np. prędkość strumienia nadążającego w kręgu pracy śruby. Tak więc uzasadnionym jest przyjęcie podziału tego zbioru na nieliczne grupy (przedziały) stanów technicznych, ze względu na rodzaj przydatności eksploatacyjnej, oraz nazywanie ich wprost „stanami” o interpretacji jak poniżej:

s_1 – stan zdatności pełnej, który umożliwia użytkowanie śruby o skoku nastawnym w pełnym zakresie obciążeń, do których została przysposobiona w fazie projektowania i wytwarzania,

s_2 – stan zdatności pełnej, który umożliwia użytkowanie śruby o skoku nastawnym w pełnym zakresie obciążeń, do których została przysposobiona w fazie projektowania i wytwarzania lecz z istotnie zmniejszoną sprawnością ogólną,

s_3 – stan zdatności częściowej, który umożliwia użytkowanie śruby o skoku nastawnym w ograniczonym zakresie obciążeń, mniejszych od tych, do których została przysposobiona w fazie projektowania i wytwarzania,

s_4 – stan niezdatności, który uniemożliwia użytkowanie śruby o skoku nastawnym, np. skutkiem uszkodzenia, wykonywania prac obsługowych.

W wymienionych stanach (jako podzbiorach) można wyróżnić przykładowo następujące stany elementarne np:

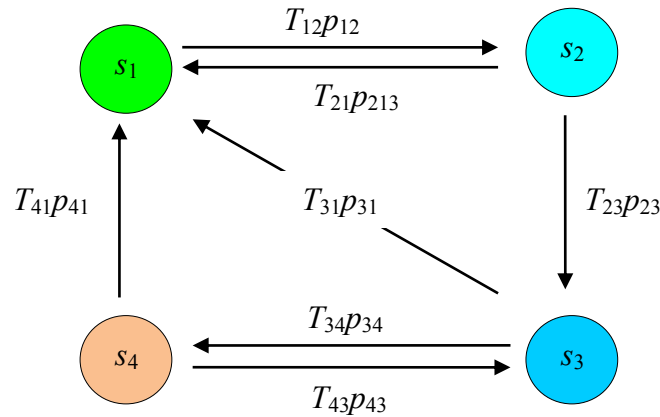
- s_2 : s_{21} – porośnięcie płatów śruby nastawnej,
 s_{22} – zużycie powodujące drobne przecieki oleju roboczego,
.
.
 s_{2n} – stan, który powoduje złą regulację sprzężenia zwrotnego pozycji płatów śruby,
- s_3 : s_{31} – pocięte płaty śruby nastawnej,
 s_{32} – uszkodzenie lub stan, którego przyczyną jest złą regulacją zadajnika skoku śruby nastawnej,
.
.
 s_{3m} – zużycie, którego skutkiem jest nieszczelny zawór zwrotny w układzie oleju roboczego nastawy skoku,
- s_4 : s_{41} – utrata płata śruby nastawnej,
 s_{42} – zablokowanie lub zatarcie tłoka siłownika w piaście śruby nastawnej,
.
.
 s_{4k} – stan wynikający z niepoprawnego wykonania obsługi profilaktycznej polegającej na wymianie uszczelnień w układzie oleju roboczego, jako obsługa planowa.

Bardziej szczegółowy opis stanów s_1 , s_2 , s_3 i s_4 został przedstawiony w rozdziale nr V i VI.

Stan S_1 jest zbiorem stanów elementarnych, który nie należy do stanów S_2 , S_3 , i S_4 . Ze względu na to, że stan S_1 jest stanem umożliwiającym wykonanie wszystkich zadań przez śrubę nastawną z należytą sprawnością jej działania, zatem wyszczególnienie stanów $s_{1i} \in S_1$ ($i=1,2,\dots,q$) nie jest celowe. Wynika z tego, że użytkownika nie interesuje to, dlaczego SN znajduje się w stanie pełnej zdatności.

A więc wartości zbioru procesu $\{U(t): t \geq 0\}$ stanowią elementy zbioru stanów $S = \{s_i, i=1,2,3,4\}$ następujących po sobie stanów $s_i \in S$ będących w związku przyczynowym między sobą. Bardzo istotnym jest rozróżnienie stanów $s_i \in S (i=1,2,3,4)$ i jeśli to jest możliwe przedziałów czasu ich trwania. Należy przy tym stwierdzić, że użytkowanie śruby o skoku nastawnym powinno zachodzić wtedy, gdy znajduje się ona w stanie s_1 lub, co najmniej w stanie s_2 . Gdy śruba o skoku nastawnym znajduje się w stanie s_2 lub s_3 , powinna być użytkowana w możliwie najkrótszym czasie. Graficzną interpretację przejść między stanami wyszczególnionych zdatności śruby może być graf przedstawiony na rys. 3.9.

Strategia utrzymania właściwego stanu technicznego śruby (s_1 bądź s_2) wynika z różnych wariantów relacji procesu $\{U(t): t \geq 0\}$, umożliwiającego wykonanie zadania, do którego została ona przysposobiona w fazie projektowania i wytwarzania. Istnieją stany, które w racjonalnym procesie nie mogą być uwzględniane, gdyż są stosowane tylko w sytuacjach awaryjnych a więc, wyjątkowych. Tak więc stan śruby (s_1) umożliwia jej użytkowanie w dowolnej chwili z różnym obciążeniem podobnie jak stan (s_2), natomiast śruba w stanie (s_3) może być użytkowana lub obsługiwana zależnie od decyzji eksploatacyjnej. Stan (s_4) oznacza znajdowanie się śruby w stanie niezdatności z powodu uszkodzenia, co wymaga obsługi, jeśli jest to ekonomicznie uzasadnione. Natomiast obsługi planowe wyłączają śruby z eksploatacji tylko na czas wykonywania obsług planowych.



Rys. 3.9 Graf zmian stanów technicznych $s_i \in S(i=1,2,3,4)$ procesu $\{U(t): t \geq 0\}$ [58]: p_{ik} – prawdopodobieństwo przejścia procesu ze stanu s_i do stanu s_k , T_{ik} – czas trwania stanu s_i pod warunkiem przejścia procesu do stanu s_k : $i, k=1,2,3,4$

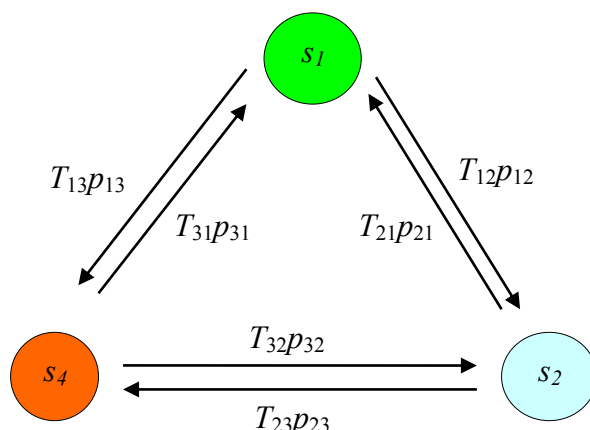
Na tym etapie eksploatacji zachodzi naruszenie struktury konstrukcyjnej wskutek demontażu ich podzespołów i elementów. A więc śruba będąca w procesie użytkowania w stanach (s_1, s_2, s_3) może pracować i być diagnozowana, bowiem może wysyłać sygnały diagnostyczne, umożliwiające rozpoznanie jej stanów elementarnych zaliczanych odpowiednio do tych stanów, oczywiście, jeśli system pomiarowy posiada odpowiednią rozdzielczość pomiarową. Zmiany tych stanów uwarunkowane są warunkami pracy a znajomość tych warunków jest konieczna, aby można było zapewnić sterowanie pracą śruby jak i rozpoznanie jej stanu technicznego.

Jeżeli, z uwagi na przyjętą strategię eksploatacji śruby nastawnej nieistotne jest rozróżnianie stanów s_1 i s_2 , można przyjąć do rozważań bardziej prosty proces zmian stanów technicznych $\{W(t): t \geq 0\}$, a mianowicie model trójstanowy $S = \{s_1, s_2, s_3\}$, gdzie będzie już inna interpretacja jego poszczególnych stanów technicznych:

- s_1 – stan zdatności pełnej, umożliwiający użytkowanie śruby o skoku nastawnym w każdych warunkach i zakresie obciążeń, do których został przysposobiony w fazie projektowania i wytwarzania,
- s_2 – stan zdatności częściowej umożliwiający użytkowanie śruby o skoku nastawnym w ograniczonych warunkach i zakresie obciążeń, mniejszych od tych, do których został przysposobiony w fazie projektowania i wytwarzania,
- s_3 – stan niezdatności, uniemożliwiający użytkowanie śruby o skoku nastawnym zgodnie z jej przeznaczeniem (np. wskutek poważnej awarii).

Zatem powstaje proces trójstanowy o realizacjach ciągłych (proces ciągły w czasie). W tym przypadku elementy zbioru $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ mogą być również uznane za wartości procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ następującego kolejno po sobie w czasie eksploatacji, opisanego wcześniej. Proces ten charakteryzuje się tym, że jeśli śruba o skoku nastawnym znajduje się w stanie s_2 lub s_3 , to nie znajduje się w stanie s_1 . Wykresem obrazującym zmiany stanu takiego trójstanowego procesu może być graf przedstawiony na rys. 3.10.

Przedstawione stany techniczne śruby o skoku nastawnym są związane ze stanami eksploatacyjnymi które odpowiadają odpowiednim stanom technicznym tej śruby. Stany te wzajemnie się implikują. Aby oba rodzaje stanów mogły być rozpatrywane łącznie, należy opracować model procesu zmian stanów eksploatacyjnych śrub o skoku nastawnym, jednakże dla potrzeb diagnostycznych taki model nie jest konieczny.



Rys.3.10. Graf zmian stanów $s_i \in S (i = 1,2,3)$ procesu $\{W(t) : t \geq 0\}$ [58] :

p_{ik} –prawdopodobieństwo przejścia procesu ze stanu s_i do stanu s_k , T_{ik} – czas trwania stanu s_i pod warunkiem przejścia procesu do stanu s_k ; $i,k=1,2,3$

3.3.2. Model zmian stanów technicznych śruby

W przypadku każdej śruby nastawnej jej proces zmian stanów technicznych jest procesem, w którym przedziały czasu trwania każdego jej stanu są zmiennymi losowymi. Poszczególne realizacje tych zmiennych losowych zależą od wielu czynników, między innymi od zużycia układów tribologicznych tych śrub (tłok siłownika-cylinder siłownika, uszczelnienie siłownika zapobiegające ubytkowi cieczy hydraulicznej MZSS, tłok i tuleja suwaka rozdzielczego itd.). W przypadku śrub nastawnych pojawia się spostrzeżenie, że zużycie ich ślizgowych układów tribologicznych jest słabo skorelowane z czasem [2,16,21,86]. Spostrzeżenie to jest istotne dlatego, że przydatność tych śrub do działania zależy głównie od stanu technicznego (a więc zużycia) ich układów tribologicznych. Umożliwiło ono prognozowanie stanu technicznego wspomnianych śrub z uwzględnieniem jedynie ich aktualnego stanu z pominięciem stanów, które zaistniały wcześniej. Wyjaśnienie tego faktu umożliwiłoby opracowanie (wskutek zastosowania teorii procesów semi-Markowa) bardziej adekwatnych probabilistycznych modeli matematycznych potrzebnych do przewidywania stanów technicznych poszczególnych śrub. Przydatność teorii procesów semi-Markowa uzasadnić można formułując następującą hipotezę (H):

stan dowolnego ślizgowego układu tribologicznego jakiegokolwiek śruby nastawnej oraz czas jego trwania zależą istotnie od stanu, który go poprzedzał, a nie od stanów wcześniejszych i przedziałów czasu ich trwania dlatego, ponieważ jego obciążenie i implikowane przez nie zarówno szybkość, jak też przyrosty zużycia są procesami o wartościach asymptotycznie niezależnych.

Stwierdzenie w tej hipotezie, że:

obciążenie i implikowane przez nie zarówno szybkość, jak też przyrosty zużycia są procesami o wartościach asymptotycznie niezależnych -

wynika z dwóch oczywistych faktów:

- 1) istnieje ścisła zależność między obciążeniem ślizgowych układów tribologicznych śrub nastawnych a ich zużyciem,

2) brak jest monotonicznych zmian obciążenia układów tribologicznych śruby nastawnej w dłuższym okresie ich pracy, a zatem można przyjąć, że obciążenie tych układów jest stacjonarne.

Stacjonarność obciążenia w szerszym sensie, oznacza w każdym przypadku, że wszystkie wielowymiarowe funkcje gęstości prawdopodobieństwa zależą tylko od wzajemnej odległości chwil $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, nie zależą natomiast od nich samych [9, 19]. Zatem jednowymiarowa funkcja gęstości prawdopodobieństwa wartości obciążenia nie zależy od chwili, której ta wartość odpowiada, zaś dwuwymiarowa funkcja gęstości prawdopodobieństwa zależy tylko od różnicy chwil, w których pojawiły się zaobserwowane wartości obciążenia. Z kolei w węższym sensie, obciążenie stacjonarne (stacjonarne całkowicie) jest rozumiane jako takie, którego wszystkie możliwe momenty statystyczne wyższych rzędów oraz momenty łączne tego obciążenia (jako procesu oddziaływań energetycznych cieplnych i mechanicznych) nie są zależne od czasu.

W praktyce istotne znaczenie ma stacjonarność obciążenia. Badanie jednak obciążeń układów tribologicznych w celu stwierdzenia wymienionych właściwości nie jest w tym przypadku konieczna. Z dotychczasowych badań nie tylko śrub, lecz również różnych maszyn wiadomo bowiem, że obciążenie ich układów tribologicznych zmienia się w sposób ciągły tak, że poszczególne jego wartości mierzone po upływie bardzo małych przedziałów czasu są silnie między sobą skorelowane. Jednak, gdy rozstęp czasu między pomiarami tych obciążeń rośnie, to korelacja między tymi obciążeniami maleje. Zatem wartości obciążenia mierzone w chwilach znacznie odległych od siebie można uznać za niezależne. Ta własność nazywana jest asymptotyczną niezależnością wartości obciążenia zmierzonej w chwili np. τ_{i+1} od wartości zmierzonej w chwili τ_i wtedy, gdy rozstęp $\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i$ jest dostatecznie (wystarczająco) duży.

Tak rozumiana asymptotyczna niezależność między wartościami obciążenia ustalonymi w chwilach τ_i oraz τ_{i+1} odzwierciedla fakt, że wraz ze wzrostem rozstępu $\Delta\tau$ zależność między tymi wartościami maleje. Z kolei z zasad pracy śrub nastawnych wiadomo również to, że w dłuższym okresie poprawnej pracy tych śrub ich obciążenie nie ma (i nie może mieć) żadnych zmian monotonicznie rosnących bądź malejących. Można więc przyjąć, że wartości maksymalne obciążenia pojawiają się w wyznaczonych chwilach przypadkowo, zawsze z określonym prawdopodobieństwem. Ten brak monotoniczności obciążenia śrub w dłuższym przedziale czasu ich pracy może być nazywany stacjonarnością ich obciążenia. Zweryfikowanie przedstawionej hipotezy (H) wymaga ustalenia (przewidzenia) konsekwencji, których zajście można sprawdzić empirycznie, jeśli hipoteza jest prawdziwa. Konsekwencje (K), które można wywieść z tej hipotezy (uwzględniając wspomniane właściwości obciążeń śrub nastawnych i ich ślizgowych układów tribologicznych), są następujące:

- K_1 - nieregularny przebieg realizacji zużycia poszczególnych ślizgowych układów tribologicznych,
- K_2 - przeplatające się realizacje procesów zużycia ślizgowych układów tribologicznych,
- K_3 - przebieg funkcji autokorelacji dla określonego ślizgowego układu tribologicznego taki, że ze wzrostem rozstępu $\Theta = h\Delta\tau$ ($h = 1, 2, \dots, n$), funkcja ta z początku szybko maleje a następnie oscyluje wokół zera ze stosunkowo niedużą i coraz mniejszą, ze wzrostem $\Delta\tau$ – amplitudą,
- K_4 - prawie normalny rozkład przyrostów zużycia ślizgowych układów tribologicznych dla dostatecznie długiego przedziału czasu (Δt) ich poprawnej pracy,
- K_5 - liniowa zależność wariancji procesu zużycia ślizgowych układów tribologicznych od czasu ich pracy.

Przedstawione konsekwencje mogą być uzasadnione tym, że jeśli właściwości obciążeń śrub nastawnych i tym samym ich układów tribologicznych są takie jak wspomniano, to powinien istnieć nieregularny przebieg realizacji zużycia tych układów. To zaś daje podstawę do uznania, że przyrosty zużycia zarejestrowane w przedziałach czasu znacznie odległych od siebie są asymptotycznie niezależne oraz, że wraz ze wzrostem czasu (rozstępu Θ , przy czym np. $\Theta = h\Delta\tau$ ($h = 1, 2, \dots, n$), między tymi przedziałami zależność między wspomnianymi przyrostami zużycia będzie malała. Zatem procesy zużycia tych układów mogą być uznane za procesy o przyrostach asymptotycznie niezależnych [54, 55, 58, 63].

Wymienione konsekwencje K_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) ujawniają probabilistyczne prawo zużycia ślizgowych układów tribologicznych śrub nastawnych. Nie są one wzajemnie sprzeczne, a ich logiczna prawdziwość nie nasuwa wątpliwości. Zatem spełniony jest warunek niesprzeczności konsekwencji, nic więc nie stoi na przeszkodzie, aby wymienione konsekwencje zostały wykorzystane do empirycznego sprawdzenia prawdziwości przedstawionej hipotezy (H), czyli do jej weryfikacji w celu zaakceptowania lub sfalsyfikowania (oczywiście w sensie logicznym i empirycznym). Weryfikacja taka polega na eksperymentalnym badaniu zużycia ślizgowych układów tribologicznych i sprawdzaniu prawdziwości konsekwencji K_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), co jest równoznaczne z ustalaniem czy konsekwencje te (jako fakty) występują czy też nie. Weryfikacja hipotezy H wymaga uznania prawdziwości następującej implikacji syntaktycznej [24, 31, 33, 58, 64]:

$$H \Rightarrow K_i (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (3.6)$$

Wtedy można zastosować wnioskowanie nie dedukcyjne (indukcyjne) przebiegające według następującego schematu [3, 19, 40, 64, 68,]:

$$[K_i (i = 1, 2, 3, 4, 5), H \Rightarrow K_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)] \vdash H \quad (3.7)$$

Logiczna interpretacja tego schematu wnioskowania jest następująca: jeżeli sprawdzenie doświadczalne konsekwencji K_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) potwierdziło ich słuszność, to jeśli prawdziwa jest implikacja (3,6), to hipoteza H jest także prawdziwa i może być zaakceptowana. Wnioskowanie indukcyjne przebiegające według podanego schematu (3,7) nazywane jest wnioskowaniem redukcyjnym. Wnioskowanie to, jak każde inne należące do tej grupy wnioskowań, nie prowadzi do wniosków pewnych, lecz jedynie prawdopodobnych [30, 34, 58, 63].

Z przedstawionej hipotezy (H) wynika, że modelami procesu zmian stanów technicznych śrub nastawnych $\{W(t): t \geq 0\}$ mogą być procesy stochastyczne o dyskretnym zbiorze stanów i ciągle w czasie trwania wyróżnionych stanów technicznych tych śrub. Rozpatrywane modele procesu zmian stanów technicznych obiektu technicznego, w ujęciu matematycznym są funkcjami odwzorowującymi zbiór chwil T w zbiór stanów technicznych S . Opracowanie takiego modelu wymaga więc ustalenia skończonego zbioru zmian stanów technicznych tych śrub.

Przyjmując za kryterium wyodrębniania stanów, przydatność śrub nastawnych do wykonywania zadań w oparciu o które ustalono zbiór stanów technicznych $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$, można rozpatrzeć $\{W(t): t \geq 0\}$:

Proces ten jest w pełni określony, jeżeli jest znana jego macierz funkcyjna [19, 22, 40]

$$Q(t) = [Q_{ij}(t)] \quad (3.8)$$

przy czym niezerowe jej elementy mają następującą interpretację:

$$Q_{ij}(t) = P\{W(\tau_{n+1}) = s_j, \tau_{n+1} - \tau_n | W(\tau_n) = s_i, s_i, s_j \in S; i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j\} \quad (3.9)$$

oraz gdy dany jest rozkład początkowy

$$p_i = P\{W(0) = s_i\}, s_i \in S; i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.10)$$

W zależności od strategii utrzymywania śrub nastawnych w stanie umożliwiającym wykonanie zadań, do których zostały one przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania, mogą być brane pod uwagę różne warianty realizacji procesu $\{W(t): t \geq 0\}$.

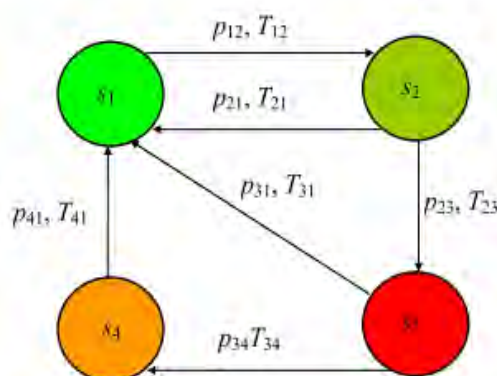
W wariancie pierwszym można przyjąć, że rozkład początkowy procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ jest następujący:

$$p_1 = P\{W(0) = s_1\} = 1, p_i = P\{W(0) = s_i\} = 0 \text{ dla } i = 2, 3, 4 \quad (3.11)$$

natomiast jego macierz funkcyjna ma następującą postać:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}(t) & 0 & 0 \\ Q_{21}(t) & 0 & Q_{23}(t) & 0 \\ Q_{31}(t) & 0 & 0 & Q_{34}(t) \\ Q_{41}(t) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Macierz (3.12) odzwierciedla zmiany stanów $s_i \in S (i = 1, 2, 3, 4)$ procesu $\{W(t): t \geq 0\}$. Zmiany te zachodzą według grafu przejść, który został przedstawiony na rys. 3.9.



Rys. 3.11 Graf zmian stanów $s_i \in S (i = 1, 2, 3, 4)$ procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ [58]

Z teorii procesów semimarkowskich wynika [4, 19, 34, 43], że prawdopodobieństwa zmian stanów dowolnego obiektu technicznego określone są przez prawdopodobieństwa p_{ij} włożonego łańcucha Markowa $\{W(\tau_n): n = 0, 1, 2, \dots\}$ w proces $\{W(t): t \geq 0\}$. Prawdopodobieństwa te tworzą następującą macierz prawdopodobieństw przejścia:

$$P = [p_{ij}; i, j = 1, 2, 3, 4] \quad (3.13)$$

przy czym:

$$p_{ij} = P\{W(\tau_{n+1}) = s_j | W(\tau_n) = s_i\} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{ij}(t)$$

Macierz (3.12) umożliwia wyznaczenie rozkładu granicznego procesu $\{W(t): t \geq 0\}$. Z macierzy (3.12) wynika, że macierz ta ma postać:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} & 0 \\ p_{31} & 0 & 0 & p_{34} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Z twierdzenia zamieszczonego w pracy [43] na s. 40 wynika, że rozkład graniczny rozpatrywanego procesu

$$P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} \{W(t) = s_j\} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t) = s_j | W(0) = s_i\} \quad (3.15)$$

jest określony wzorem

$$P_j = \frac{\pi_j E(T_j)}{\sum_{k=1}^4 \pi_k E(T_k)}, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (3.16)$$

przy czym rozkład graniczny $\pi_j (j = 1, 2, 3, 4)$ włożonego łańcucha Markowa $\{W(\tau_n): n = 0, 1, 2, \dots\}$ spełnia następujące równania:

$$[\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} & 0 \\ p_{31} & 0 & 0 & p_{34} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4] \quad (3.17)$$

$$\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \quad (3.18)$$

Korzystając z zależności (3.15 ÷ 3.17), uzyskuje się następujące wzory:

$$P_1 = E(T_1)M^1, P_2 = E(T_2)M^1, P_3 = p_{23}E(T_3)M^1, P_4 = p_{34}E(T_4)M^1 \quad (3.19)$$

przy czym:

$$M = E(T_1) + E(T_2) + p_{23}E(T_3) + p_{23}p_{34}E(T_4),$$

gdzie:

$E(T_j)$ - wartość oczekiwana czasu trwania stanu $s_j \in S (j = 1, 2, 3, 4)$

P_{ij} - prawdopodobieństwo przejścia procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ ze stanu s_j do stanu $s_i (s_i, s_j \in S; i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j)$.

Poszczególne prawdopodobieństwa $P_j (j = 1, 2, 3, 4)$, określone wzorami (3.15), mają następujące interpretacje:

$$P_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t)\} = s_1, \quad P_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t)\} = s_2$$

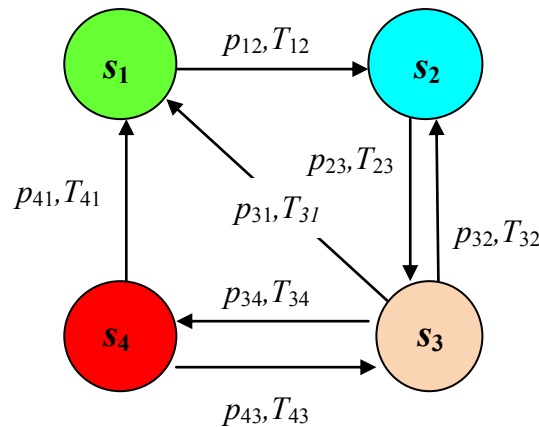
$$P_3 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t)\} = s_3, \quad P_4 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t)\} = s_4$$

W przedstawionym wariantcie przewidziane są sytuacje, w których użytkownik może zaryzykować podjęcie się wykonania zadania przy stanie s_2 śruby a nawet zaryzykować podjęcie się wykonania niektórych zadań przy stanie s_3 tego urządzenia.

W wariancie drugim można przyjąć, że rozkład początkowy procesu $\{W^*(t): t \geq 0\}$ jest taki sam, jak w wariancie pierwszym. Natomiast macierz funkcyjna $Q^*(t)$ tego procesu ma następującą postać:

$$Q^*(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}^*(t) & 0 & 0 \\ Q_{21}^*(t) & 0 & Q_{23}^*(t) & 0 \\ Q_{31}^*(t) & Q_{33}^*(t) & 0 & Q_{34}^*(t) \\ Q_{41}^*(t) & 0 & Q_{43}^*(t) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Macierz (3.20) odzwierciedla zmiany stanów $s_i \in S (j = 1, 2, 3, 4)$ procesu $\{W^*(t): t \geq 0\}$, według grafu przejść (od jednego z tych stanów do innego) przedstawionego na rys. 3.12.



Rys. 3.12 Graf zmian stanów $s_i \in S (i=1, 2, 3, 4)$ procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ [58]

Rozkład graniczny tego procesu można wyznaczyć w sposób analogiczny, jak poprzednio. Rozkład ten jest następujący:

$$P_1^* = (1 - p_{23}^* p_{32}^* - p_{34}^* p_{43}^*) E(T_1^*) M^{*-1}, \quad P_2^* = (1 - p_{34}^* p_{43}^*) E(T_2^*) M^{*-1}, \quad (3.21)$$

$$P_3^* = p_{23}^* E(T_1^*) M^{*-1}, \quad P_4^* = p_{23}^* p_{34}^* E(T_4^*) M^{*-1}$$

przy czym:

$$M^* = (1 - p_{23}^* p_{32}^* - p_{34}^* p_{43}^*) E(T_1^*) + (1 - p_{34}^* p_{43}^*) E(T_2^*) + p_{23}^* E(T_3^*) + p_{23}^* p_{34}^* E(T_4^*)$$

gdzie:

$p_{ij}^*, E(T_j^*)$ - odpowiednio prawdopodobieństwo przejścia i wartość oczekiwana zmiennej losowej T_j^* o podobnej interpretacji jak we wzorze (3.18)

W wariancie trzecim można przyjąć, że rozkład początkowy procesu $\{W^{**}(t): t \geq 0\}$ jest taki sam, jak w wariancie pierwszym i drugim. Natomiast macierz funkcyjna $Q^{**}(t)$ tego procesu ma następującą postać:

$$Q^{**}(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}^{**}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{23}^{**}(t) & 0 \\ 0 & Q_{32}^{**}(t) & 0 & Q_{34}^{**}(t) \\ Q_{41}^{**}(t) & 0 & Q_{43}^{**}(t) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Rozkład graniczny tego procesu można wyznaczyć w sposób analogiczny, jak w wariancie pierwszym i drugim. Rozkład ten jest następujący:

$$P_1^{**} = p_{34}^{**} p_{41}^{**} E(T_1^{**}) M^{**^{-1}}, \quad P_2^{**} = (1 - p_{34}^{**} p_{43}^{**}) E(T_2^{**}) M^{**^{-1}} \quad (3.23)$$

$$P_3^{**} = E(T_3^{**}) M^{**^{-1}}, \quad P_4^{**} = p_{34}^{**} E(T_4^{**}) M^{**^{-1}}$$

przy czym:

$$M^{**} = p_{34}^{**} p_{41}^{**} E(T_1^{**}) + (1 - p_{34}^{**} p_{43}^{**}) E(T_2^{**}) + E(T_3^{**}) + p_{34}^{**} E(T_4^{**})$$

gdzie:

$p_{ij}^{**}, E(T_j^{**})$ - odpowiednio prawdopodobieństwo przejścia i wartość oczekiwana zmiennej losowej T_j o podobnej interpretacji, jak we wzorze (13.18).

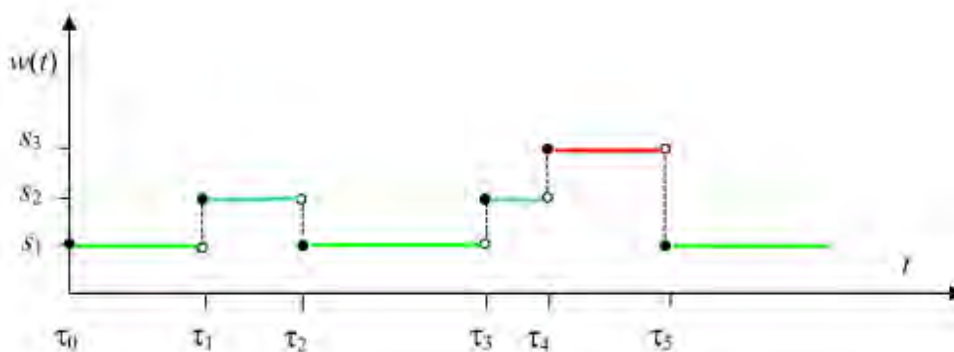
W wariancie tym nieuwzględniana jest odnowa śrub nastawnych o stanie s_2 , natomiast odnowa pełna tego rodzaju śrub przewidziana jest dopiero wtedy, gdy osiągnięty zostanie przez nie stan s_4 .

Porównując zależności (3.19) i (3.21), można zauważyć, że są one identyczne w przypadku gdy: $p_{32}^* = 0$ i $p_{43}^* = 0$. W tym wariancie również przewidziano sytuacje, w których użytkownik może zaryzykować podjęcie się wykonania zadania przy stanie s_2 śruby, a nawet - zadania, gdy śruba jest w stanie s_3 . Dotyczy on jednak takiej sytuacji eksploatacyjnej, w której dopuszczalne są zarówno odnowy pełne (co jest równoznaczne z odtworzeniem stanu s_1 , utraconego w czasie użytkowania), jak też odnowy niepełne (częściowej). Odnowa częściowa jest tu równoznaczna z odtworzeniem stanu s_2 śruby, gdy znajduje się on w stanie s_3 lub stanu s_3 - gdy znajduje się on w stanie s_4 .

W przypadku, gdy w przyjętej strategii eksploatacji śrub nastawnych nie jest istotne rozróżnianie stanów s_1 oraz s_2 , można rozpatrywać bardziej prosty proces $\{W(t): t \in T\}$ zmian stanów technicznych tych SN, a mianowicie model o zbiorze stanów:

$$S = \{s_1, s_2, s_3\}$$

Zbiór stanów technicznych $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ można uważać za zbiór wartości procesu stochastycznego $\{W(t): t \in T\}$ o przedziałach stałych i prawostronnie ciągłych realizacjach, rys 3.13.



Rys. 3.13. Przykład realizacji procesu $\{W(t): t \in T\}$ śruby nastawnej [30]:

$\{W(t): t \in T\}$ - proces zmian stanów technicznych, t - czas eksploatacji; s_1 - stan pełnej zdolności, s_2 - stan częściowej zdolności, s_3 - stan niezdatności.

Rozkład początkowy rozpatrywanego procesu (rys.3.13) o grafie przejść (rys. 3.10) jest określony wzorem:

$$P_i = P\{W(0) = s_i\} = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = 0 \\ 0 & \text{dla } i = 2,3 \end{cases} \quad (3.23)$$

Natomiast macierz funkcyjna, w przypadku, gdy funkcja $Q_{32}(t)$ jest niezerowa, czyli $Q_{32}(t) \neq 0$, jest następująca:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}(t) & Q_{13}(t) \\ Q_{21}(t) & 0 & Q_{23}(t) \\ Q_{31}(t) & Q_{32}(t) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

W przypadku, gdy funkcja $Q_{32}(t)$ jest równa zero, czyli $Q_{32}(t) = 0$, macierz (3.24) przyjmie postać:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}(t) & Q_{13}(t) \\ Q_{21}(t) & 0 & Q_{23}(t) \\ Q_{31}(t) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Wobec tego dla przedstawionego procesu $\{W(t): t \in T\}$ o macierzy funkcyjnej określonej wzorem (3.25), można wyznaczyć następujący jego rozkład graniczny:

$$P_1 = \frac{\pi_1 E(T_1)}{H}; \quad P_2 = \frac{\pi_2 E(T_2)}{H}; \quad P_3 = \frac{\pi_3 E(T_3)}{H}$$

przy czym:

$$\pi_1 = \frac{1}{2 + p_{12}p_{23}}; \quad \pi_2 = \frac{p_{12}}{2 + p_{12}p_{23}}; \quad \pi_3 = \frac{1 - p_{12}p_{21}}{2 + p_{12}p_{23}} \quad (3.26)$$

$$\pi_1 E(T_1) + \pi_2 E(T_2) + \pi_3 E(T_3)$$

gdzie:

P_1, P_2, P_3 - prawdopodobieństwa tego, że śruba nastawna znajduje się odpowiednio w stanach: s_1, s_2, s_3 ; p_j - prawdopodobieństwo graniczne, włożonego w proces $\{W(t): t \in T\}$, łańcucha Markowa opisującego możliwości pojawienia się stanu $s_j, j = 1, 2, 3$; P_{ij} - prawdopodobieństwo przejścia proces $\{W(t): t \in T\}$ ze stanu s_i do stanu s_j ; $E(T_j)$ - wartość oczekiwana czasu trwania stanu s_j .

3.4. Stany eksploatacyjne śruby nastawnej

3.4.1. Opis stanów eksploatacyjnych śruby

Śruby nastawne w okresie między obsługami głównymi, nazywanym okresem międzyremontowym, mogą znajdować się w jednym z następujących stanów eksploatacyjnych $e_j \in E(j = 1, 2, 3, 4)$:

- użytkowania wynikającego z wykonywania danego zadania przez śrubę nastawna (e_1),
- użytkowania wynikającego z postoju użytkowego śruby nastawnej (e_2),
- obsługiwanian planowego, czyli profilaktycznego śruby nastawnej, bądź jej poszczególnych układów (e_3),
- obsługiwanian nieplanowego, wymuszonego uszkodzeniami śrub nastawnych bądź poszczególnych ich podzespołów (e_4).

Elementy zbioru $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ mogą być uznane za wartości procesu zmian stanów eksploatacyjnych $\{X(t): t \geq 0\}$, następujących kolejno po sobie w czasie eksploatacji dowolnej śruby. Zatem proces ten jest procesem czterostanowym o ciągłych realizacjach (procesem

ciągłym w czasie). Proces ten podobnie jak proces zmian stanów technicznych $\{W(t): t \geq 0\}$ może być również uznany za proces semimarkowski [26, 30, 34, 58, 63].

Śruby nastawne mogą być użytkowane bądź obsługiwane w czasie eksploatacji.

Użytkowanie śrub następuje wtedy, gdy znajdują się w stanach eksploatacyjnych e_1 lub e_2 , natomiast ich obsługiwanie, gdy znajdują się w stanach eksploatacyjnych e_3 lub e_4 . Śruby te mogą być użytkowane, gdy spełnione są następujące warunki:

- znajdują się w stanie zdadności technicznej s_1 bądź s_2 ,
- stan, w którym się one znajdują, umożliwi wykonanie zadania,
- czynnik energetyczny, którym jest olej ma wymagane własności fizykochemiczne,
- zasoby oleju wystarczają do wykonania zadania, w przypadku niewielkich nieszczelności,
- nie braknie odpowiednich części wymiennych.

W przypadku, gdy chociaż jeden z pierwszych czterech warunków nie zostanie spełniony, śruby muszą być obsługiwane w celu odnowy utraconych własności użytkowych. Potrzeba wykonania odpowiedniej obsługi może pojawić się nagle, co zachodzi wtedy, gdy nastąpi uszkodzenie śruby bądź może być wynikiem realizacji określonego planu działania profilaktycznego opracowanego na bazie wyników diagnozowania śruby. Uszkodzenie jest więc przyczyną wykonywania obsługiwanego nieplanowego (e_4), natomiast wyniki badań diagnostycznych i wynikająca z nich diagnoza mogą spowodować wykonywanie (odpowiednich do opracowanej diagnozy o stanie technicznym śruby) obsług profilaktycznych (e_3). W tym ostatnim przypadku obsługiwanie powinno być wykonywane nie tylko wtedy, gdy śruba znajduje się w stanie zdadności częściowej (s_2), ale także wtedy, gdy znajduje się w stanie pełnej zdadności (s_1). Ta ostatnia potrzeba pojawia się wtedy, jeśli z badań diagnostycznych wyniknie, że w czasie wykonywania zadań może nastąpić zmiana stanu śruby z s_1 na s_2 , który w danej sytuacji eksploatacyjnej uniemożliwia wykonanie podjętego zadania. Oczywiście jest, że w praktyce istnieją także takie zadania, które mogą być wykonane nawet wtedy, gdy śruba znajduje się w stanie s_2 . Do takich zadań można zaliczyć ruch manewrowy statku w porcie.

W przypadku, gdy nie zostanie spełniony którykolwiek z dwóch ostatnich warunków, śruba nie może być zastosowana zgodnie z przeznaczeniem, do którego została przysposobiona w fazie projektowania i wytwarzania. Przywrócenie stanu zdadności śrubie wymaga wtedy wykonania odpowiedniego obsługiwania e_4 .

Sterowanie decyzyjne zmianami stanów eksploatacyjnych $e_j \in E (j = 1, 2, 3, 4)$ powinno być takie, aby nie występował stan e_4 , a jeśli wystąpi, to aby trwał jak najkrócej. To drugie wymaganie dotyczy także czasu trwania stanu e_3 . Użytkowanie śrub, jeśli są one w stanie e_1 , przynosi dochody armatorowi bądź inne korzyści wynikające z wykonania zadania transportowego przez statek. Stan e_2 wymaga tylko nakładów na utrzymanie śruby w stanie s_1 , czyli pełnej zdadności. Wobec tego sterowanie decyzyjne powinno prowadzić również do minimalizacji czasu trwania stanu e_2 .

Sterowanie decyzyjne stanami dowolnej śruby nastawnej $e_j \in E (j = 1, 2, 3, 4)$ zależy ściśle od:

- warunków, w których są bądź będą wykonywane zadania przez śrubę,
- czasu, który jest niezbędny do wykonania podejmowanego zadania,
- stanu technicznego, w którym się śruba znajduje.

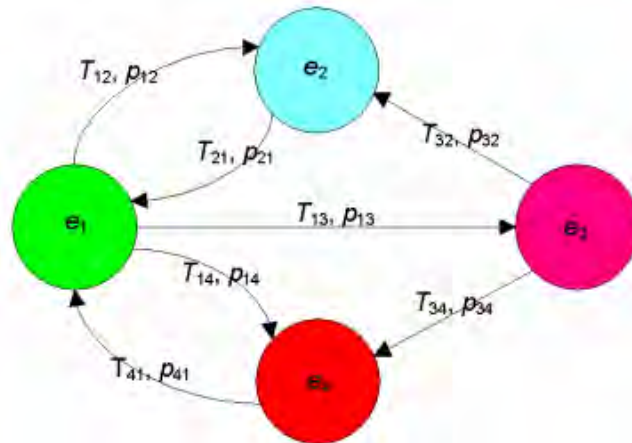
Zatem przy założeniu, że użytkownik śruby jest właściwie przygotowany do eksploatacji śrub nastawnych, można sterowanie decyzyjne rozpatrywać jako celowe działanie powodujące zmiany parametrów struktury konstrukcyjnej danej śruby przez zainicjowanie i podtrzymywanie racjonalnego, jednoczesnego przebiegu procesów $\{W(t): t \geq 0\}$ oraz $\{X(t): t \geq 0\}$. Takie działanie oznacza decyzyjne sterowanie procesem eksploatacji śrub nastawnych [26, 30, 40,].

3.4.2. Model zmian stanów eksploatacyjnych śruby

Każda śruba nastawna, jak wykazano to w punkcie 3.4.1 pracy, może znajdować się w jednym z następujących stanów eksploatacyjnych, zachodzących w okresie jej eksploatacji:

- użytkowania wynikającego z wykonywania danego zadania przez śrubę (e_1);
- użytkowania wynikającego z postępu użytkowego śruby (e_2);
- obsługiwanego planowego, czyli profilaktycznego poszczególnych podzespołów śruby (e_3);
- obsługiwanego nieplanowego (wymuszonego uszkodzeniami elementów) poszczególnych podzespołów śruby (e_4).

W czasie eksploatacji śruby można wyróżnić przejścia między nimi co zostało przedstawione na rys. 3.14.

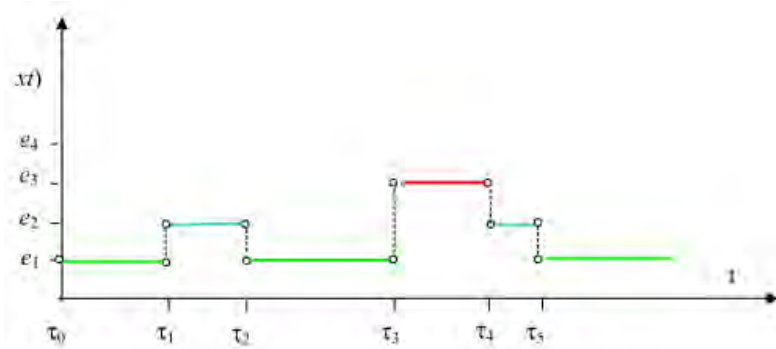


Rys. 3.14. Graf zmian stanów eksploatacyjnych śrub nastawnych [58]:

T_{ij} , p_{ij} – odpowiednio: czas i prawdopodobieństwa przejścia silnika ze stanu e_i do stanu e_j ; $i, j=1,2,3,4$.

Stany e_1 i e_2 są stanami pożądanymi, natomiast stany e_3 i e_4 są niepożądane, gdyż utrudniają zastosowanie każdej śruby nastawnej zgodnie z przeznaczeniem, w dowolnej chwili czasu eksploatacji. Stanów e_3 i e_4 , które są złem koniecznym, nie można uniknąć w eksploatacji tych śrub [6, 9, 10], ale poprzez odpowiednie sterowanie (w tym decyzyjne) tymi śrubami można zmniejszyć ujemny wpływ tych stanów na wskaźniki eksploatacyjne.

Przykład realizacji procesu zmian stanów eksploatacyjnych dowolnej śruby nastawnej, w okresie międzyremontowym, przedstawiony jest na rys. 3.15.



Rys. 3.15. Przykład realizacji procesu $\{X(t): t \in T\}$: śrub nastawnych [30]:

$\{X(t): t \in T\}$: - proces zmian stanów eksploatacyjnych, t - czas eksploatacji, (e_1) - stan użytkowania aktywnego, (e_2) - stan użytkowania pasywnego, (e_3) - stan obsługiwanego planowego (profilaktycznego), (e_4) - stan obsługiwanego nieplanowego (wymuszonego uszkodzeniami)

Rozkład początkowy rozpatrywanego procesu $\{X(t): t \in T\}$: (rys.3.15) jest określony wzorem:

$$P_i = P\{X(0) = s_i\} = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = 1 \\ 0 & \text{dla } i = 2,3,4 \end{cases} \quad (3.27)$$

natomiast macierz funkcyjna rozpatrywanego procesu $\{X(t): t \in T\}$: ma następującą postać:

$$Q^x(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}^x(t) & Q_{13}^x(t) & Q_{14}^x(t) \\ Q_{21}^x(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{32}^x(t) & 0 & Q_{34}^x(t) \\ Q_{41}^x(t) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Podobnie, jak w przypadku przedstawionych procesów semimarkowskich zmian stanów technicznych, dla przedstawionego procesu $\{X(t): t \in T\}$: o rozkładzie początkowym (3.27) oraz macierzy funkcyjnej określonej wzorem (3.28), można określić jego rozkład graniczny w następującej formie:

$$P_1^X = \frac{E(T_1^X)}{M^*}; \quad P_2^X = \frac{(p_{12}^X + p_{13}^X p_{32}^X)E(T_2^X)}{M^*}; \quad P_3^X = \frac{p_{13}^X E(T_3^X)}{M^*}; \quad P_4^X = \frac{(1 - p_{12}^X + p_{13}^X p_{32}^X)E(T_4^X)}{M^*} \quad (3.29)$$

Przy czym

$$M^* = E(T_1^X) + (p_{12}^X + p_{13}^X p_{32}^X)E(T_2^X) + p_{13}^X E(T_3^X) + (1 - p_{12}^X - p_{13}^X p_{32}^X)E(T_4^X)$$

Gdzie:

p_1^X, p_2^X, p_3^X - prawdopodobieństwa, że śruba nastawna znajduje się odpowiednio w stanach eksploatacyjnych: e_1, e_2, e_3, e_4 , P_{jr}^X - prawdopodobieństwo przejścia śruby ze stanu e_j do stanu e_r , $E(T_r^X)$ - wartość oczekiwana czasu trwania stanu e_r

Model procesu zmian stanów technicznych $\{W(t): t \in T\}$ i model procesu zmian stanów eksploatacyjnych $\{X(t): t \in T\}$: śrub nastawnych są procesami wzajemnie zależnymi, zachodzącymi równocześnie w fazie eksploatacji tych śrub. Wobec tego należy opracować model procesu jednoczesnych zmian stanów procesów $\{W(t): t \in T\}$: i $\{X(t): t \in T\}$: Taki proces, którego stanami byłyby równocześnie zachodzące stany $s_i \in S$ procesu $\{W(t): t \in T\}$: oraz stany $e_j \in E$ procesu $\{X(t): t \in T\}$: może być nazwany modelem procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym.

3.5. Proces eksploatacji śruby o skoku nastawnym

3.5.1. Opis stanów eksploatacyjnych śruby

W publikacji [30, 33, 58] zostały przedstawione modele procesu eksploatacji silników spalinowych jako proces semimarkowski. Umożliwia on wyznaczenie wskaźników niezawodności i bezpieczeństwa, niezbędnych do zaplanowania oraz zapewnienia racjonalnej eksploatacji tych silników. Podobny model można opracować dla śrub o skoku nastawnym. Model taki w formie decyzyjnego (sterowanego) procesu semimarkowskiego jest niezbędny do sterowania decyzyjnym procesem eksploatacji śrub nastawnych. Decyzyjny (sterowany) proces semimarkowski to taki proces $\{Y(t): t \geq 0\}$, którego realizacja zależy od podejmowanych decyzji w chwilach $\tau_0 = 0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n, \dots$ zmian stanów tego procesu.

Wartościami tego procesu są stany $z_i \in Z$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) o następującej interpretacji: $z_1 = (s_1, e_2)$, $z_2 = (s_1, e_1)$, $z_3 = (s_2, e_1)$, $z_4 = (s_2, e_3)$, $z_5 = (s_3, e_3)$, $z_6 = (s_3, e_4)$.

Zinterpretowane stany pojawiają się kolejno stosownie do podejmowanych w chwilach τ_n decyzji $d_i(\tau_n)$.

3.5.2. Model procesu eksploatacji śruby

Proces eksploatacji dowolnej śruby nastawnej jest łącznym procesem jednoczesnych zmian stanów technicznych i stanów eksploatacyjnych śruby tego rodzaju [7, 15, 49, 76, 81].

Najprostszym modelem procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym może być dwuwymiarowy proces stochastyczny $\{Y(t): t \in T\}$, którego współrzędnymi są: proces zmian stanów technicznych $\{W(t): t \in T\}$ oraz zmian stanów eksploatacyjnych $\{X(t): t \in T\}$ tych śrub.

Wartościami procesu $\{W(t): t \in T\}$ mogą być elementy zbioru stanów technicznych $S = \{s_1, s_2, s_3\}$, zaś wartościami procesu $\{X(t): t \in T\}$ – elementy zbioru stanów eksploatacyjnych $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ wspomnianych śrub.

Opisanie procesu $\{Y(t): t \in T\}$ wymaga znalezienia jego łącznego rozkładu. Łączny rozkład prawdopodobieństwa dwuwymiarowego procesu $Y(t) = [W(t), X(t)]$ można przedstawić w następującej postaci:

$$p(s_i, e_j, t) = P\{W(t) = s_i, X(t) = e_j\} \quad (3.30)$$

Rozkład prawdopodobieństw $p(s_i, e_j, t)$ można ująć w formie następującej macierzy:

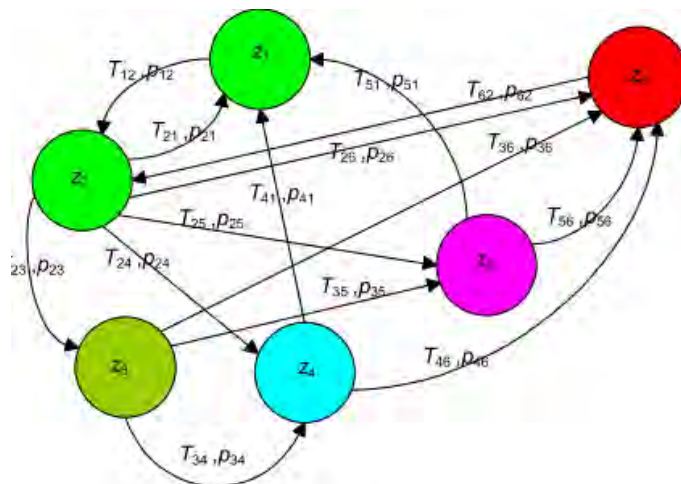
$$Q = \begin{bmatrix} p(s_1, e_1, t) & p(s_1, e_2, t) & 0 & 0 \\ p(s_2, e_1, t) & 0 & p(s_2, e_3, t) & 0 \\ 0 & 0 & p(s_3, e_3, t) & p(s_3, e_4, t) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Wobec tego proces eksploatacji dowolnej śruby nastawnej może być rozpatrywany jako proces stochastyczny $\{Y(t): t \in T\}$ o wartościach przyjmowanych ze zbioru

$$Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6\}$$

których interpretacja jest następująca:

$$z_1 = (s_1, e_2), \quad z_2 = (s_1, e_1), \quad z_3 = (s_2, e_1), \quad z_4 = (s_2, e_3), \quad z_5 = (s_3, e_3), \quad z_6 = (s_3, e_4)$$

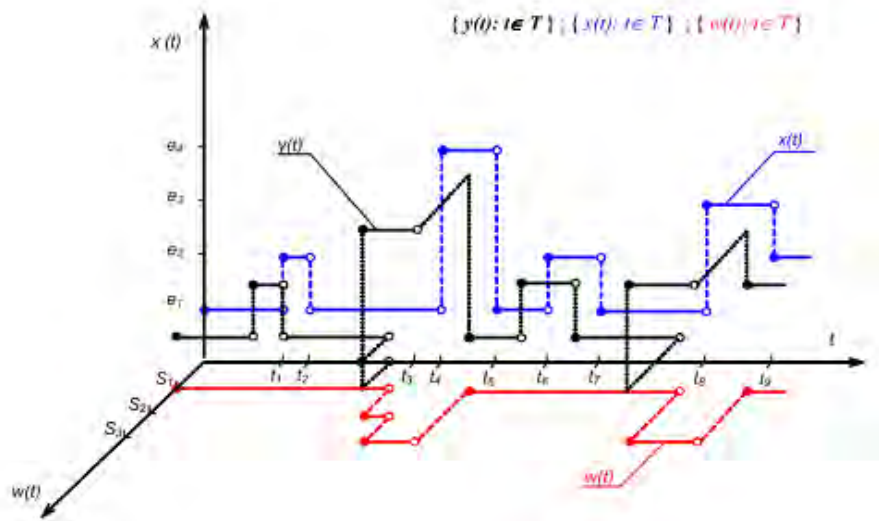


Rys. 3.16 Graf stanów procesu eksploatacji śrub nastawnych o zapłonie samoczynnym w okresie między dwiema kolejnymi obsługami głównymi [30]: T_{ij} – czas trwania stanu z_i pod warunkiem przejścia procesu do stanu z_j ; p_{ij} – prawdopodobieństwo przejścia procesu ze stanu z_i do stanu z_j , $i \neq j$, $i, j = 1, 2, \dots, 6$

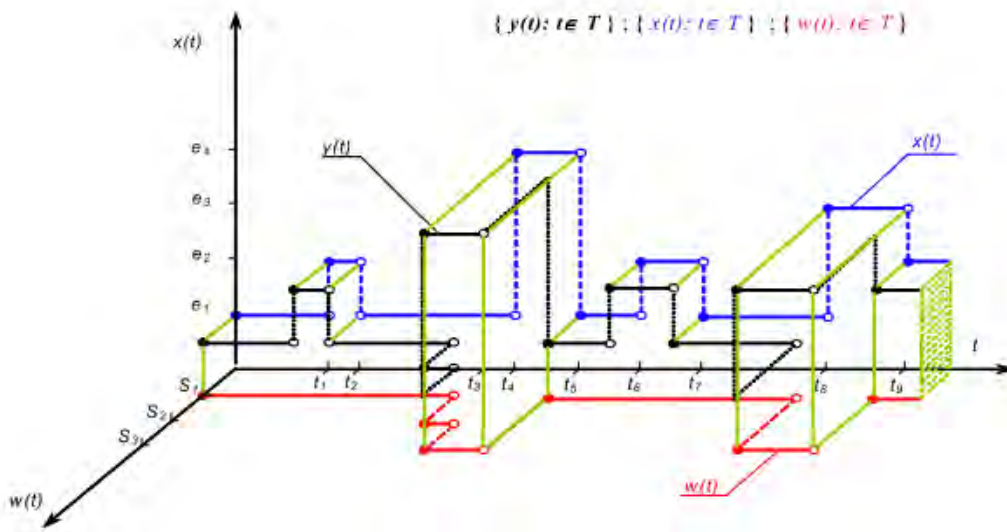
Właściwości procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym implikują ściśle określoną postać grafu zmian jego stanów $z_i \in Z (i = 1, 2, \dots, 6)$ Graf taki przedstawiony jest na rys 3.16.

Przykład realizacji procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym w okresie międzyremontowym $\{Y(t): t \in T\}$ został przedstawiony na rys. 3.17. Proces ten jest procesem semimarkowskim o składowych, którymi są: proces zmian stanów technicznych $\{W(t): t \in T\}$ oraz proces zmian stanów eksploatacyjnych $\{X(t): t \in T\}$ tych śrub. Wartościami procesu $\{W(t): t \in T\}$ są elementy zbioru stanów technicznych $S = \{s_1, s_2, s_3\}$, zaś wartościami proces $\{X(t): t \in T\}$ - elementy zbioru stanów eksploatacyjnych $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ wspomnianych śrub.

W celu bardziej przejrzystego zobrazowania przebiegu procesu $\{Y(t): t \in T\}$ przebieg widoczny na rys. 3.17 został przedstawiony w wersji geometrycznej na rys. 3.18.



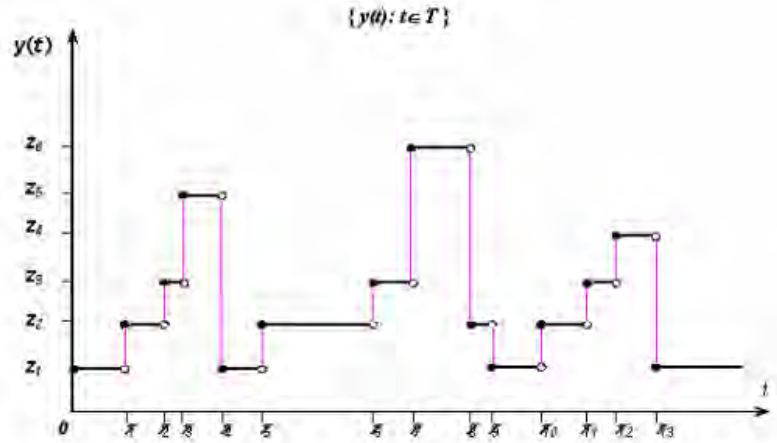
Rys. 3.17 Przykład realizacji dwuwymiarowego procesu $Y(t):t(T)$ śrub o skoku nastawnym [58]: $Y(t):t(T)$ -procesu eksploatacji, t – czas eksploatacji, $W(t):t(T)$ – proces zmian stanów technicznych śruby, $Y(t):t(T)$ - zmiany stanów eksploatacyjnych śrub



Rys. 3.18. Przykład realizacji procesu $\{Y(t): t(T)\}$ śrub o skoku nastawnym w wersji geometrycznej [58]: $\{Y(t): t(T)\}$ - proces eksploatacji, t – czas eksploatacji, $\{W(t): t(T)\}$ - proces zmian stanów technicznych śruby $\{X(t): t(T)\}$ – zmiany stanów eksploatacyjnych śruby

Model procesu eksploatacji őrub o skoku nastawnym jako jednowymiarowy proces semimarkowski $\{Y(t): t(T)\}$ został przedstawiony na rys. 3.19. Model ten jest procesem o zbiorze stanów $Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6\}$, których interpretacja jest następująca [15, 40, 65]:

$$z_1 = (s_2, e_2); z_2 = (s_1, e_1), z_3 = (s_2, e_1); z_4 = (s_2, e_3); z_5 = (s_3, e_3); z_6 = (s_3, e_4)$$



Rys.3.19. Przykład realizacji jednowymiarowego procesu $\{Y(t): t(T)\}$ [30]:
 $\{Y(t): t(T)\}$ – proces eksploatacji őruby, t – czas eksploatacji őruby

Rozkład początkowy rozpatrywanego procesu $\{Y(t): t \in T\}$ (rys. 3.19) jest określony wzorem:

$$P_i = P\{Y(0) = z_i\} = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = 1 \\ 0 & \text{dla } i = 2,3,4,5,6 \end{cases} \quad (3.32)$$

Natomiast macierz funkcyjna tego procesu ma następującą postać:

$$Q^Y(t) = \begin{pmatrix} 0 & Q_{12}^Y(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21}^Y(t) & 0 & Q_{23}^Y(t) & Q_{24}^Y(t) & Q_{25}^Y(t) & Q_{26}^Y(t) \\ 0 & 0 & 0 & Q_{34}^Y(t) & Q_{35}^Y(t) & Q_{36}^Y(t) \\ Q_{41}^Y(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{46}^Y(t) \\ Q_{51}^Y(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{56}^Y(t) \\ 0 & Q_{62}^Y & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

Podobnie jak w poprzednich przypadkach rozpatrywania procesów semimarkowskich, dla przedstawionego procesu $\{Y(t): t \in T\}$ o rozkładzie początkowym (3.32) oraz macierzy funkcyjnej określonej wzorem (3.33), można określić jego rozkład graniczny w następującej formie:

$$\left. \begin{aligned} P_1^Y &= \frac{[p_{21}^Y + p_{41}^Y(p_{24}^Y + p_{23}^Y p_{34}^Y) + p_{51}^Y(p_{25}^Y + p_{23}^Y p_{35}^Y)]E(T_1^Y)}{H} \\ P_2^Y &= \frac{E(T_2^Y)}{H}; P_3^Y = \frac{p_{23}^Y E(T_3^Y)}{H}; P_4^Y = \frac{(p_{24}^Y + p_{23}^Y p_{34}^Y)E(T_4^Y)}{H}; \\ P_5^Y &= \frac{(p_{25}^Y + p_{23}^Y p_{35}^Y)E(T_5^Y)}{H}; \\ P_6^Y &= \frac{[1 - p_{21}^Y - p_{41}^Y(p_{24}^Y + p_{23}^Y p_{34}^Y) - p_{51}^Y(p_{25}^Y + p_{23}^Y p_{35}^Y)]E(T_6^Y)}{H} \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

przy czym:

$$H = [p_{21}^Y + p_{41}^Y(p_{24}^Y + p_{23}^Y p_{34}^Y) + p_{51}^Y(p_{25}^Y + p_{23}^Y p_{35}^Y)]E(T_1^Y) + E(T_2^Y) + p_{23}^Y E(T_3^Y) \\ + (p_{24}^Y + p_{23}^Y p_{34}^Y)E(T_4^Y) + (p_{25}^Y + p_{23}^Y p_{35}^Y)E(T_5^Y) \\ + [1 - p_{21}^Y - p_{41}^Y(p_{24}^Y + p_{23}^Y p_{34}^Y) - p_{51}^Y(p_{25}^Y + p_{23}^Y p_{35}^Y)]E(T_6^Y)$$

gdzie:

$P_1^Y, P_2^Y, P_3^Y, P_4^Y, P_5^Y, P_6^Y$ – prawdopodobieństwa, że śruba nastawna znajduje się odpowiednio w stanach: $z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6$,
 p_{ij}^Y - prawdopodobieństwa przejścia śruby ze stanu z_i do stanu z_j
 $E(T_i^Y)$ - wartość oczekiwana czasu trwania stanu z_i

Prawdopodobieństwa graniczne $P_i^Y, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ podobnie jak prawdopodobieństwa rozkładów granicznych wyznaczone dla poprzednich procesów, mają istotne znaczenie w eksploatacji śrub o skoku nastawnym, ponieważ charakteryzują ich niezawodność. Praktyczną przydatność przedstawionego modelu procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym można także uzasadnić kolejną hipotezą (H^*) o następującej treści:

proces eksploatacji śrub o skoku nastawnym (rozumiany jako funkcja losowa, której argumentem jest czas a wartością zmienne losowe, oznaczające stany techniczne i eksploatacyjne tych śrub), zachodzący w racjonalnym systemie eksploatacji (to jest takim systemie, w którym jest rachunek optymalizacyjny) jest procesem, którego stan rozpatrywany w dowolnej chwili $t_n (n = 0, 1, \dots, m; t_0 < t_1 < \dots < t_m)$ zależy od stanu bezpośrednio go poprzedzającego i nie zależy stochastycznie od stanów, które zaszły wcześniej i przedziałów ich trwania.

Hipoteza ta, podobnie jak ta, która została sformułowana w odniesieniu do ślizgowych układów tribologicznych śrub nastawnych, również wyjaśnia, dlaczego można, w przypadku znajomości stanu procesu w dowolnej chwili τ_m , prognozować przebieg tego procesu w chwilach późniejszych. Wyjaśnia tym samym fakt obserwowany w praktyce eksploatacyjnej, a polegający na wystarczająco trafnym dla potrzeb praktycznych, prognozowaniu (intuicyjnym lub według znanego trendu zmian) czasu poprawnej pracy śruby, jedynie przy znajomości ich aktualnego stanu i warunków realizacji zadań oraz zasobów materiałowo-energetycznych.

Sformułowana hipoteza może być także przedstawiona w następującej formie:

prognozowanie stanu procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym jest możliwe dlatego ponieważ stan następny śruby w chwili $\tau_n + \tau$ gdy znany jest on w chwili $\tau_n (n = 0, 1, \dots, m; \tau_0 < \tau_1 \dots \tau_m)$ zależy istotnie od stanu bezpośrednio go poprzedzającego, a nie zależy od stanów, które zaszły wcześniej i przedziałów czasu ich trwania.

Należy przy tym zauważyć, że sformułowana hipoteza nie zawiera żadnych takich sprzeczności, które mogłyby ją sfalsyfikować jeszcze przed jej sprawdzeniem. Zweryfikowanie tej hipotezy wymaga sprecyzowania konsekwencji z niej wynikających. Konsekwencje te są następujące:

- K^*1 – prawdopodobieństwo ($p_{ij}; i \neq j; i, j \in N$) i przejścia procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym z jakiegokolwiek stanu z_i , w którym się on aktualnie znajduje, do następnego (dowolnego) stanu z_j , nie zależą od tego, w jakich stanach ten proces był wcześniej:

- K^*_2 – przedziały bezwarunkowego czasu trwania poszczególnych stanów z_i procesu eksploatacyjnego śrub o skoku nastawnym są zmiennymi losowymi $(T_i, i \in N)$ stochastycznie niezależnymi;
- K^*_3 – przedziały czasu trwania każdego z możliwych do zajścia stanów z_i procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym pod warunkiem, że następnym stanem będzie jeden z pozostałych stanów tego procesu, są zmiennymi losowymi $T_{ij}; ij, i, j \in N$ stochastycznie niezależnymi.

Wymienione konsekwencje K_k^* ($k = 1, 2, 3$) ujawniają probabilistyczne prawo zmian stanów eksploatacji śrub o skoku nastawnym. Nie są one wzajemnie sprzeczne, a ich logiczna prawdziwość nie nasuwa wątpliwości. Zatem spełniony jest warunek niesprzeczności konsekwencji, a więc nic nie stoi na przeszkodzie, aby wymienione konsekwencje zostały wykorzystane do empirycznego sprawdzenia prawdziwości podstawowej hipotezy (H^*), czyli do jej weryfikacji w celu zaakceptowania lub sfalsyfikowania (oczywiście w sensie logicznym).

Weryfikacja taka polega na eksperymentalnym badaniu pojawiania się stanów eksploatacyjnych śrub i sprawdzeniu prawdziwości konsekwencji K_k^* ($k=1, 2, 3$), co jest równoznaczne z ustaleniem, czy konsekwencje te (jako fakty) wystąpią, czy też nie. Weryfikacja hipotezy H^* wymaga uznania prawdziwości następującej implikacji syntaktycznej:

$$H^* \Rightarrow K_k^* (k=1,2,3) \quad (3.35)$$

Wtedy można zastosować wnioskowanie niededukcyjne (indukcyjne) przebiegające według następującego schematu [4, 28, 30, 41, 58, 63]:

$$[K_k^* (k=1,2,3), H \Rightarrow K_k^* (K=1,2,3)] \vdash H \quad (3.36)$$

Logiczna interpretacja tego schematu wnioskowania jest następująca: jeżeli sprawdzenie doświadczalne konsekwencji K_k^* ($k = 1, 2, 3$) potwierdziło ich słuszność, to jeśli prawdziwa jest implikacja (3.35), to hipoteza H^* jest także prawdziwa i może być zaakceptowana.

Wnioskowanie indukcyjne przebiegające według podanego schematu (3.36) nazywane jest wnioskowaniem redukcyjnym. Wnioskowanie to, jak każde inne należące do tej grupy wnioskowań, nie prowadzi do wniosków pewnych, lecz jedynie prawdopodobnych [30, 43 58, 63].

Z przedstawionej hipotezy (H^*) wynika, że modelami procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym mogą być procesy stochastyczne o dyskretnym zbiorze stanów i ciągle w czasie trwania wyróżnionych stanów technicznych tych śrub. Rozpatrywane modele procesu zmian stanów technicznych śrub o skoku nastawnym, w ujęciu matematycznym są funkcjami odwzorowującymi zbiór chwil T w zbiór stanów technicznych Z .

3.6 Zastosowanie diagnostyki do decyzyjnego sterowania procesem eksploatacji śrub

3.6.1 Sformułowanie zagadnienia sterowania decyzyjnego

W każdej chwili τ_n , gdy proces $\{Y(t): t \geq 0\}$ znajduje się w stanie z_i (tzn. gdy $Y(\tau_n) = z_i$), może być podjęta decyzja $d_i(\tau_n)$. Decyzja ta polega na wyborze funkcji $Q_{ij}(t, d_i, (\tau_n))$ określającej probabilistyczny mechanizm przebiegu (ewolucji) tego procesu w przedziale czasu $[\tau_n, \tau_{n+1}]$. Jego przebieg w przedziale czasu $[\tau_n, \tau_{n+1}]$ zależy od decyzji

$d_i(\tau_n)$ podjętej w chwili τ_n dotyczącej wyboru stanu $z_j (j = 1, 2, \dots, 6)$ procesu, do którego należy doprowadzić proces w chwili τ_{n+1} .

Decyzja ta wpływa na rozkład $[p_{ij}(d_i(\tau_n)), z_i \in Z]$. Od decyzji $d_i(\tau_n)$ zależy również wartość przedziału czasu między chwilami, w których następują zmiany procesu eksploatacji $\{Y(t): t \geq 0\}$ śruby ze stany $z_i \in Z$ do stanów $z_j \in Z (i, j = 1, 2, \dots, 6; i \neq j)$. Wartość tego przedziału jest realizacją zmiennej losowej o dystrybucji $F_{ij}(t, d_i(\tau_n))$. Zależności powyższe wynikają z tego, że: $Q_{ij}(t, d_i(\tau_n)) = p_{ij}(d_i(\tau_n))F_{ij}(t, d_i(\tau_n))$.

W każdej chwili $\tau_n (n = 0, 1, 2, \dots)$ procesu eksploatacji $\{Y(t): t \geq 0\}$ śruba może znajdować się w dowolnym stanie $z_i \in Z (i = 1, 2, \dots, 6)$. W dowolnej z tych chwil można rozpatrywać skończony zbiór decyzji $D_i(\tau_n)$. Dla rozpatrywanego procesu $\{Y(t): t \geq 0\}$ zbiór możliwych (dopuszczalnych) decyzji można formalnie przedstawić jako: $D_i(\tau_n)$ przy czym $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ natomiast $n \in \{0, 1, 2, \dots, m\}$, gdzie m – ustalona liczba chwil, w których mogą być podejmowane decyzje.

Ciąg możliwych decyzji, jaki może powstać w czasie realizacji procesu eksploatacji śruby o skoku nastawnym odpowiednio uporządkowany, nazywany jest strategią podejmowania decyzji [5, 23, 30, 58]. Ciąg taki może być w ujęciu formalnym przedstawiony jako: $d = \{d_1(\tau_n), d_2(\tau_n), \dots, d_6(\tau_n); n = 0, 1, 2, \dots\}$.

Uporządkowanie ciągu wynika z istniejącej sytuacji eksploatacyjnej i związanej z nią sytuacji decyzyjnej. Decyzja (postanowienie o podjęciu w ustalonej kolejności określonych akcji) może być podjęta dopiero po przeanalizowaniu przewidywanych skutków (konsekwencji) jej wykonania. Decydowanie, którego jest ona wynikiem, powinno być rozumiane jako dokonywanie nielosowego wyboru w działaniu, mimo że w procesie decydowania muszą być (i z reguły są) zawsze wykorzystywane probabilistyczne i stochastyczne miary zdarzeń i procesów fizycznych towarzyszących funkcjonowaniu śrub o skoku nastawnym. Decydowanie polega na wykorzystaniu informacji uzyskanych na temat własności wspomnianych zjawisk, zdarzeń i procesów. Informacje te powinny umożliwić: określenie zbioru stanów możliwych do wyboru i własności tych stanów, dokonanie oceny możliwości zapewnienia pożądanego przebiegu poszczególnych stanów, umożliwiających skuteczne, niezawodne, efektywne i ekonomiczne eksploataowanie śrub o skoku nastawnym. Dopiero wtedy można dokonać wyboru rodzaju działania, w wyniku którego powstaje decyzja, wpływająca na przebieg procesu eksploatacji śrub.

Decyzja $d_i(\tau_n)$ może zależeć od realizacji procesu $\{Y(t): t \geq 0\}$ do chwili τ_n . Decyzje takie podejmowane są zawsze po zakończeniu działania komisji eksploatacyjnych, których zadaniem jest stwierdzenie przyczyn i skutków rozległych uszkodzeń śrub, z reguły powodujących duże straty (nie tylko ekonomiczne) i z tego powodu nazywanych awariami, katastrofami, itp. W codziennej jednak praktyce eksploatacyjnej, przy podejmowaniu decyzji $d_i(\tau_n)$ w chwili τ_n nie są uwzględniane (ponieważ nie ma takiej potrzeby) realizacje procesu do tej chwili. Takie strategie podejmowania decyzji eksploatacyjnych są więc strategiami markowskimi. Wynika z tego, że strategia d jest nazywana strategią markowską $d(M)$ wtedy, gdy dla każdego stanu $z_i \in Z (i = 1, 2, \dots, 6)$ oraz $n \in \{0, 1, 2, \dots, m\}$, decyzje $d_i(\tau_n)$ nie zależą od realizacji procesu do chwili τ_n .

Spośród wszystkich rodzajów strategii markowskich największe znaczenie w eksploatacji śrub o skoku nastawnym podobnie jak tłokowych silników spalinowych mają strategie stacjonarne [27, 35]. Strategia markowska $d(M)$ jest strategią stacjonarną $d(M_s)$ wtedy, gdy dla każdego stanu $z_i \in Z (i = 1, 2, \dots, 6)$ oraz $n \in \{0, 1, 2, \dots, m\}$, podejmowane decyzje są identyczne, a więc wtedy gdy $d_i(\tau_n) = d_i = const$.

Z rozważań wynika, że przyjęcie markowskiej, stacjonarnej strategii decyzyjnej jest równoznaczne z podejmowaniem decyzji takich samych, jeśli proces $\{Y(t): t \geq 0\}$ znajdzie się

w określonym stanie $z_i \in Z(i=1,2,\dots,6)$ niezależnie od wcześniejszego przebiegu tego procesu (od wcześniej zaistniałych jego stanów). Oznacza to, że markowska, stacjonarna strategia decyzyjna jest ciągiem stałych decyzji możliwych do podjęcia. Wyrazami tego ciągu, w przypadku rozpatrywanego procesu $\{Y(t): t \geq 0\}$, są decyzje ($d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$), na które mają wpływ: intensywność użytkowania aktywnego śruby, czas trwania obsług profilaktycznych i ich zakres, częstość wykonywania obsług, koszt trwania stanów $z_i \in Z(i=1,2,\dots,6)$ koszt zmiany stanu z_i na stan $z_j, z_i, z_j \in Z(i, j=1,2,\dots,6; z_i \neq z_j)$.

Wyznaczenie składowych tych wektorów wymaga szczegółowego opisanie procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym.

Z rozważań wynika, że uwzględnienie w semimarkowskim modelu procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym, przedstawionym w publikacji, zbioru możliwych do podjęcia decyzji d i (τn) , przy czym $(i = 1, 2, \dots, 6; n = 0, 1, 2, \dots)$ oznacza skonstruowanie decyzyjnego procesu semimarkowskiego i tym samym możliwość optymalizacji rzeczywistego procesu eksploatacji tych śrub.

Zastosowanie decyzyjnych procesów semimarkowskich do optymalizacji procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym pozwala na dokonanie wyboru strategii eksploatacyjnej, umożliwiającej uzyskanie maksymalnych korzyści ekonomicznych.

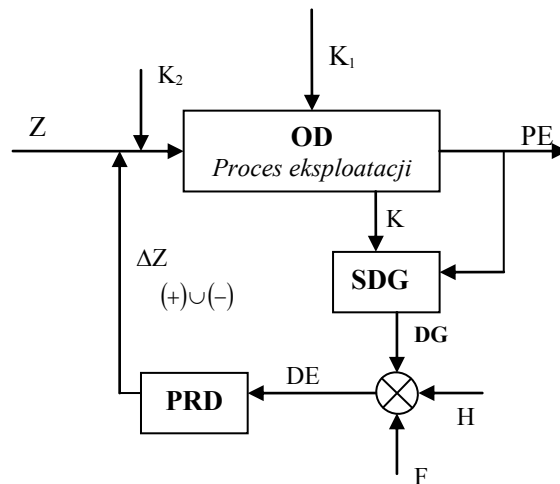
W przypadku śrub o skoku nastawnym, podobnie jak w przypadku silników spalinowych, czas poprawnej pracy może być uważany za zmienną losową o rozkładzie gamma [30, 33, 58]. Również czas wykonywania obsługi technicznej, w celu naprawy uszkodzonej śruby lub wykonywania obsługi profilaktycznej do odnowy śruby, może być opisany rozkładem gamma. Możliwość wykorzystania rozkładu gamma do opisu wymienionych zmiennych losowych znacznie ułatwia optymalizację procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym.

3.6.2. Ogólna koncepcja sterowania decyzyjnego procesem eksploatacji śrub nastawnych

Sterowanie decyzyjne procesem eksploatacji śrub nastawnych wymaga zastosowania odpowiedniego systemu diagnozującego (*SDG*), funkcji kryterialnej umożliwiającej podejmowanie decyzji optymalnych oraz znajomości ograniczeń eksploatacyjnych (*H*) [30, 33, 58].

Przy takim sterowaniu istotne znaczenie na trafność podejmowanych decyzji (*DE*), mają zakłócenia (*K*). Sytuacja ta powinna być odzwierciedlona przez określenie wiarygodności diagnozy o stanie procesu eksploatacji jako obiektu diagnozowanego (*SND*). Potrzeba taka jest więc konsekwencją przyjętej koncepcji funkcjonowania systemu diagnozującego (*SDG*) w systemie eksploatacji śrub nastawnych (rys. 3.20)

Przedstawiony stan rzeczy powoduje, że zarówno systemy diagnozujące (*SDG*) jak również systemy sterujące (*ST*), obecnie z reguły automatyczne, są systemami złożonymi, wyposażonymi w różne układy, niekiedy niekonwencjonalne, także w mikrokomputery i układy mikroprocesorowe, ponadto spełniają różne funkcje i wymagania [55, 64]. Należy się wobec tego spodziewać, że zużycie tego rodzaju systemów, podobnie jak zużycie śruby jako systemu diagnozowanego (*SDN*) i sterowanego (*STN*), musi mieć istotny wpływ na funkcjonowanie obu tych rodzajów systemów, tzn. tych które tworzą system sterowania (*ST*) oraz system diagnozowania, inaczej diagnostyczny (*SD*). System sterowania (*ST*) jest systemem składającym się z dwóch podsystemów (systemów): sterowanego (*STN*) i sterującego (*STR*). System diagnostyczny (*SD*) składa się również z dwóch podsystemów (systemów): diagnozowanego (*SDN*) i diagnozującego (*SDG*). W tej sytuacji zachodzi potrzeba uwzględnienia, w procesie decyzyjnym, niezawodności systemu sterującego (*STR*) i systemu diagnozującego (*SDG*), co wymaga określenia wiarygodności diagnoz generowanych przez system diagnozujący.



Rys.3.20. Schemat funkcjonowania systemu diagnostycznego w systemie eksploatacji śrub nastawnych: OD – obiekt diagnozowany (proces eksploatacji silników), PE – parametry eksploatacyjne SN, SDG – system diagnozujący, DG – diagnoza, H – ograniczenia, F – funkcja kryterialna, DE – decyzje eksploatacyjne, ΔZ – przedział zmiany potencjału eksploatacyjnego Z, K_1 – zakłócenia deterministyczne, K_2 – zakłócenia losowe, K – parametry diagnostyczne, PRD – program realizacji decyzji eksploatacyjnej

System taki powinien być dostosowany do potrzeb identyfikacji stanów technicznych i energetycznych śruby jako zarazem systemu sterowanego i diagnozowanego (STN i SDN). System diagnozujący (SDG) powinien przy tym wymuszać pożądane funkcjonowanie systemu sterowania (sterującego i sterowanego) stosownie do przebiegu implikujących się wzajemnie procesów zmian stanów technicznych i energetycznych śruby.

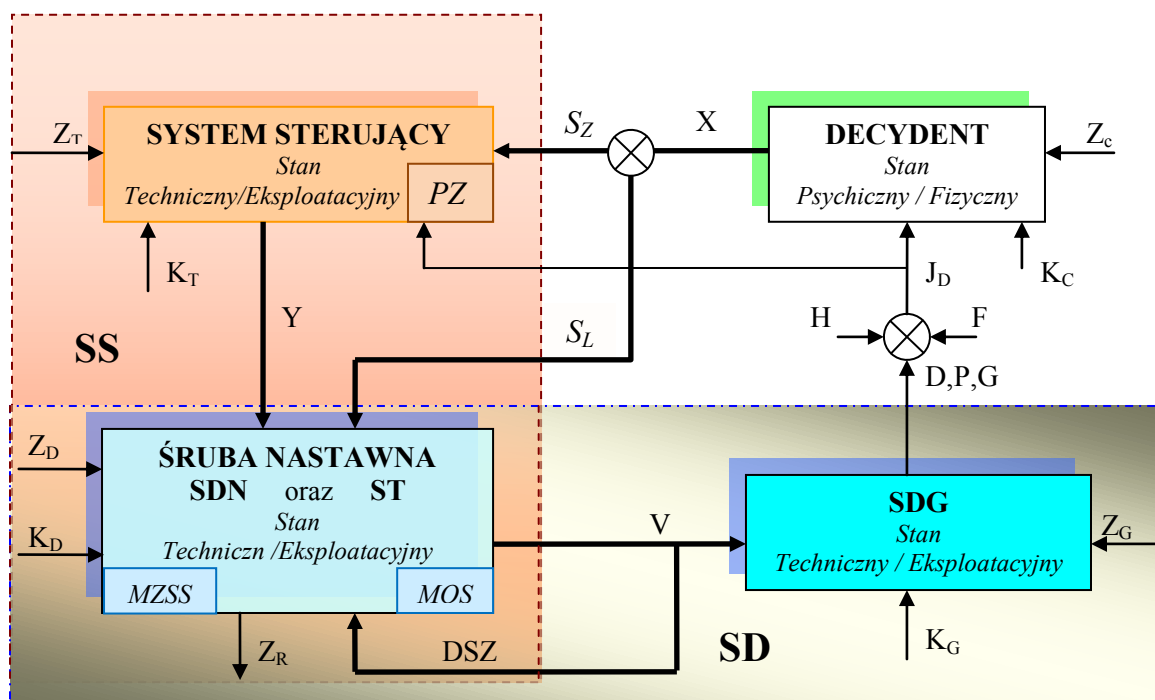
Wymaga to dokonania identyfikacji śrub o skoku nastawnym jako systemów sterowanych (STN) i diagnozowanych (DGN).

Ze względu na to, że śruby o skoku nastawnym należą do najważniejszych urządzeń układu napędowego statku, wskazane jest zatem dokonanie takiej identyfikacji właśnie dla tych urządzeń.

Identyfikacja taka dla śrub nastawnych będzie miała podobny przebieg jak dla silników głównych [58].

Sterowanie procesem eksploatacji dowolnej okrętowej śruby o skoku nastawnym, podobnie jak sterowanie procesem eksploatacji silników głównych i innych urządzeń napędu głównego statku, rozumianym tak, jak przedstawiono go w publikacjach [22, 24, 26, 33, 58], wymaga między innymi sterowania zarówno stanami technicznymi jak również energetycznymi każdego z wymienionych rodzajów urządzeń tych siłowni w czasie jego eksploatacji, przy czym sterowanie stanami energetycznymi może być realizowane tylko w czasie działania (pracy) tych urządzeń. W przypadku śruby o skoku nastawnym, sterowanie to ogólnie polega na uporządkowanym oddziaływaniu na parametry jej struktury konstrukcyjnej, także urządzeń sterujących i bezpośredniego użytkownika (systemu sterującego), według zasad, programów i algorytmów przyjętych przez decydenta, a dostosowanych do wykonywanych zadań, których podejmowanie wymaga uwzględnienia ograniczeń (H) funkcji kryterialnej (F) oraz wyników diagnozowania w formie diagnoz (D), bądź diagnoz i prognoz (P) zarazem, bądź też diagnoz i ewentualnych genez (G) albo diagnoz pełnych (czyli łącznie diagnoz, prognoz i genez), generowanych przez system diagnozujący (SDG). Sytuacja ta została zobrazowana dla silnika głównego w formie schematu przedstawionego w publikacjach [27, 58]. Podobnie można przedstawić uproszczony model funkcjonowania śruby o skoku nastawnym z uwzględnieniem diagnozowania i sterowania w czasie eksploatacji, co zostało pokazane na rys. 3.21.

Wspomniane zadanie $Z = \langle D_Z, W_R, t \rangle$ może być interpretowane jako poprawne działanie – inaczej funkcjonowanie (D_Z) śruby, w określonych warunkach eksploatacji (W_R) i w ustalonym czasie (t). Sterownie to powinno zapewnić racjonalną pracę śruby w sytuacjach zwykłych (normalnych) i szczególnych (skomplikowanych, niebezpiecznych i awaryjnych). Racjonalna praca śruby o skoku nastawnym w warunkach normalnych ma miejsce wtedy, gdy nie jest ona przeciążona, a sprawność śruby nie odbiega znacznie od sprawności optymalnej, możliwej do uzyskania dla danego typu śrub, a w najistotniejszych ich układach tribologicznych nie występuje tarcie technicznie suche. Natomiast racjonalna praca danej śruby w warunkach awaryjnych to taka praca która nie prowadzi do przedwczesnych uszkodzeń powodujących stan niezdatności, charakteryzujący się rozległym naruszeniem struktury konstrukcyjnej oraz umożliwia bezpieczne wyłączenie jej z pracy. Podobnie należy rozumieć sterowania realizowane w odniesieniu do silników głównych i innych urządzeń siłowni okrętowych.



Rys. 3.21 Uproszczony model funkcjonowania śruby nastawnej z uwzględnieniem diagnozowania i sterowania w czasie eksploatacji:

D – diagnoza, DSZ – destrukcyjne sprzężenie zwrotne, F – funkcja, G – geneza, H – ograniczenia eksploatacyjne, J_D – informacja decyzyjna, K_C – zakłócenia w podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych, K_D – zakłócenia systemu diagnozowanego (SDN) i zarazem sterowanego (ST), K_G – zakłócenia systemu diagnozującego (SDG), K_T – zakłócenia systemu sterującego, MOS – mechanizm obrotu skrzydeł, $MZSS$ – mechanizm zmiany skoku śruby, P – prognoza, PZ – podsystem zabezpieczeń, SD – system diagnostyczny (SDN i SDG), S_L – sterowanie lokalne, S_Z – sterowanie zdalne, V – wektor procesów wyjściowych, X – wektor decyzji, Y – wektor sterowania, Z_C – zasilanie decydenta, Z_D – zasilanie doprowadzone, Z_G – zasilanie diagnozujące, Z_R – zasilanie tracone, Z_T – zasilanie systemu sterującego.

Racjonalne sterowanie pracą śruby, podobnie jak silnika głównego [30, 33, 58] i innych urządzeń napędu głównego statku oraz związane z nim podejmowanie decyzji eksploatacyjnych (DE) stosownie do istniejącego stanu technicznego i energetycznego określonej śruby wymagają łącznej (jednocześnie) znajomości aktualnej diagnozy (D),

genezy (G) i prognozy (P), uzależnionej od wewnętrznych i zewnętrznych ograniczeń (H), przyjętej funkcji kryterialnej (F) i różnych zakłóceń:

- systemu sterowanego i diagnozowanego (K_D);
- systemu diagnozującego (K_G);
- systemu decyzyjnego (K_C), bądź określonego decydenta;
- systemu sterującego (K_T).

Na podstawie dotychczasowych rozważań [30, 33, 55, 58, 64], można uznać, że proces diagnozowania jest dwuwymiarowym procesem stochastycznym, który składa się z procesu $\{B(t): t \geq 0\}$ funkcjonowania SDG i procesu pozyskiwania informacji $\{C(\mathcal{G}): \mathcal{G} \geq 0\}$ o stanie SDN (śruby nastawnej). Proces ten można więc określić następująco:

$$D(t, \mathcal{G}) - [B(t), C(\mathcal{G})]; t, \mathcal{G} \in R$$

gdzie:

- $B(t)$, składowa procesu, która jest rozpatrywana w czasie funkcjonowania (użytkowania) SDG, czyli składowa rozpatrywana w czasie długim (w czasie pracy SDG, w którym nie muszą być generowane diagnozy chwilowe); eksploatacji
- $C(\mathcal{G})$, składowa procesu, która jest rozpatrywana w czasie realizowania pomiaru i wnioskowania diagnostycznego, czyli składowa rozpatrywana w czasie krótkim (w czasie pracy SDG, w którym uzyskiwana jest diagnoza).

Proces $\{C(\mathcal{G}): \mathcal{G} \geq 0\}$ zawsze tworzy następujące realizacje:

- badanie diagnostyczne,
- wnioskowanie diagnostyczne.

Wnioskowanie diagnostyczne w najogólniejszym przypadku tworzą wnioskowania: sygnałowe, pomiarowe, objawowe, strukturalne i eksploatacyjne.

Z przedstawionej koncepcji wynika, że proces $\{C(\mathcal{G}): \mathcal{G} \geq 0\}$ ma wartości (stany), które odpowiadają badaniu diagnostycznemu i wymienionym rodzajom wnioskowania, a czas trwania tych rodzajów wnioskowania odpowiada realizacjom tych stanów. Zatem jest to proces klasy: dyskretny w stanach i ciągły w czasie. Z oczywistych powodów proces ten może być uznany za semimarkowski [30, 33, 53, 58, 63].

Badanie diagnostyczne

Badanie diagnostyczne śruby nastawnej polega na obserwowaniu i organoleptycznym przyrządowym oraz operatorowym rozpoznawaniu właściwości sygnałów diagnostycznych (termodynamicznych, wibroakustycznych, radiograficznych, ultradźwiękowych i innych), a ponadto – na dodatkowym pomiarze (za pomocą urządzeń pomiarowych SDG) wartości parametrów diagnostycznych wspomnianych sygnałów generowanych przez SDN. Badanie to umożliwia utworzenie zbiorów wyników organoleptycznego rozpoznania i wartości wykonanych pomiarów. Zbiory te zawierają pierwotną informację o stanie (technicznym, energetycznym, ekonomicznym i innym) SDN.

Badanie diagnostyczne może być zrealizowane tylko wtedy, jeżeli będą znane relacje sygnałowe i pomiarowe. Im relacje te będą liczniejsze, oraz dokładniej rozpoznane i sprecyzowane, tym dokładniejsze mogą być wyniki tych badań.

Relacje sygnałowe powinny odwzorowywać:

- stopnie przydatności sygnałów (ze względu na warunki ich obserwowania, łatwość analizowania, kwalifikacje osób diagnozujących, itd.),
- sposoby wyodrębniania sygnału użytecznego, podatności (bądź odporności) na zakłócenia addytywne i multiplikatywne, pojemności informacyjne, szybkości przekazywania informacji.

Relacje pomiarowe powinny odwzorowywać:

- warunki badań i dokładność metod badań,
- dokładność urządzeń pomiarowych,
- fizyczne właściwości badanych sygnałów i mierzonych ich parametrów,
- wymaganą dokładność wyników badania diagnostycznego.

Pomimo realizowania badań diagnostycznych według powyższej sformułowanych relacji sygnałowych i pomiarowych, wyniki tych badań będą zawsze obarczone błędami, niekiedy znacznymi, które są czynnikiem sprawczym uzyskania błędnej (niewiarygodnej) diagnozy. Błędy te w głównej mierze zależą od dokładności zastosowanych metod pomiarowych, dokładności urządzeń pomiarowych *SDG*, trwania czasu pomiaru i czasu próbkowania tego pomiaru oraz zakłóceń występujących w czasie wykonywania tego pomiaru, trafności zamontowania czujników pomiarowych i co jest bardzo istotne kwalifikacji osoby wykonującej te badania.

W świetle powyższego wyniki badania diagnostycznego będą określały jedynie w przybliżeniu stan śruby nastawnej, z czego wynika oczywisty wniosek, że użytkownik diagnozy nie będzie dokładnie informowany o stanie śruby nastawnej, a jedynie będzie posiadał przybliżony obraz tego stanu. Jeżeli więc występujące błędy nie są możliwe do całkowitego wyeliminowania, co wynika z pojęcia pomiaru doskonałego [8, 36], istotnym jest zatem, w jakim stopniu wiarygodna jest informacja o stanie śruby nastawnej zawarta w otrzymanych wynikach badania diagnostycznego. Wiarygodność ma duże znaczenie, gdyż otrzymane wyniki muszą być przetwarzane w celu uzyskania informacji diagnostycznych (diagnozy o stanie śruby nastawnej), w kolejnych etapach wnioskowania, które również są obarczone błędem związanym z opracowaniem takiej diagnozy.

Wnioskowanie sygnałowe

Wnioskowanie sygnałowe daje możliwość zebrania informacji o tym, czy śruba nastawna poprawnie pracuje tzn. czy jest lub nie w wymaganym stanie, bez konieczności wykonania pomiarów. Jeśli po wykonaniu tego wnioskowania zachodzą wątpliwości, czy śruba nastawna jest w odpowiednim (oczekiwanym) stanie, wówczas wykonuje się pomiary i na ich podstawie wnioskowanie pomiarowe. Tak więc wnioskowanie sygnałowe umożliwia określenie objawów w ujęciu jakościowym, jako efekt analizy i oceny właściwości sygnału na podstawie zmysłów osoby dokonującej diagnozy (tzn. rozpoznanie organoleptyczne). Dla praktycznej przydatności tych objawów muszą być określone (znane) relacje sygnałowe. Ta faza wnioskowania umożliwia ustalenie np. czy drgania węzłów konstrukcyjnych śruby nastawnej przekraczają normalny poziom, z czego można wnioskować, że nastąpiło zbyt duże zużycie tych elementów lub utrata wyważenia śruby (np. ubytki materiału, nawinięcie liny). Podobnie wskutek zauważonych zbyt małych drgań można wnioskować, że proces przeniesienia mocy na płyty śruby nastawnej nie przebiega właściwie. Stosując wnioskowanie sygnałowe, utworzy się zbiór objawów, które są informacją diagnostyczną, którą można nazwać diagnozą objawową. Są one opracowywane przez diagnostę metodą organoleptyczną przez dokonanie analizy i oceny sygnałów diagnostycznych generowanych przez śrubę nastawną. Tak więc, biorąc pod uwagę, że jest ona dokonywana przez diagnostę (obsługę) przy wykorzystaniu własnych zmysłów i wiedzy, jest ona obciążona błędem, i niekiedy dość znacznym.

Wnioskowanie pomiarowe

Wnioskowanie pomiarowe bazuje na analizie i ocenie wyników badań diagnostycznych na podstawie wyników wykonanych odpowiednich pomiarów. Wnioskowanie pomiarowe umożliwia utworzenie informacji o tym, czy śruba nastawna pracuje poprawnie i w jakim jest stanie. Podstawę wnioskowania stanowią wyniki wykonanych pomiarów za

pomocą urządzeń pomiarowych SDG. Zebrane zbiory wyników pomiarów podlegają analizie i wyodrębnieniu z nich objawów. Zatem na podstawie wnioskowania jest utworzenie zbioru objawów w ujęciu ilościowym wskutek dokonania analizy i oceny wyników pomiarów.

Zbiór tych wyodrębnionych objawów jest informacją diagnostyczną, którą można nazwać diagnozą objawową którą uzyskano w wyniku wykonania diagnostycznych badań empirycznych. Diagnozę mogą stanowić różne informacje szczegółowe np., że wartość wyszczególnionego parametru diagnostycznego jest poza przedziałem wartości dopuszczalnych lub, że zawiera się w tym przedziale bądź, że brak jest określonego sygnału lub wartości jego parametru itd. Rozpoznanie niewłaściwej składowej sygnału diagnostycznego jest powodem wykonania stosownego pomiaru, np. pomiaru ciśnienia oleju w systemie hydraulicznym śruby.

Wnioskowanie pomiarowe, podobnie jak sygnałowe służy do opracowania diagnozy objawowej, przy zastosowaniu różnych metod (często z zastosowaniem złożonego aparatu matematycznego) oraz urządzeń pomiarowych o różnej dokładności. Dlatego też z tego powodu (i nie tylko) wyniki tego wnioskowania też są obarczone błędem.

Wnioskowanie objawowe

Wnioskowanie objawowe daje możliwość opracowania informacji o stanie śruby nastawnej, czyli określenie (identyfikację) tego stanu poprzez ujawnienie właściwości struktury tego systemu (np. technicznej, energetycznej, funkcjonalnej itd.). Wnioskowanie objawowe polega na wyodrębnieniu w zbiorze objawów (symptomów) informacji (najczęściej) o właściwościach struktury konstrukcyjnej (technicznej) śruby nastawnej. Wynikiem wnioskowania objawowego jest diagnoza strukturalna, najczęściej jest to diagnoza techniczna (o stanie technicznym *SDN*). Aby diagnoza uzyskana w wyniku stosowania wnioskowania objawowego była wiarygodna, powinny być znane relacje objawowe, czyli relacje między objawami (symptomami) a właściwościami struktury technicznej, funkcjonalnej itd. Wnioskowanie objawowe może być także obarczone błędami. Właściwości struktury technicznej opisywane są zbiorem parametrów, do których można zaliczyć np.: stan powierzchni roboczych, luzy w skojarzeniach ruchowych elementów układu olejowego, stan fizyko-chemiczny czynnika roboczego, stan izolacji elektrycznej itd.

Wnioskowanie strukturalne

Wnioskowanie strukturalne umożliwia opracowanie informacji o właściwościach eksploatacyjnych śruby nastawnej, bazuje ono na wcześniej opisanej diagnozie objawowej, co umożliwi jedynie określenie wspomnianych właściwości śruby nastawnej, a co za tym idzie ustalenie potencjalnych możliwości funkcjonowania tej śruby. Formą tych możliwości może być np. oszacowanie wartości oczekiwanej czasu poprawnej pracy do momentu jej uszkodzenia bądź maksymalnej prędkości obrotowej śruby nastawnej lub wychylenie jej płatów (obciążenie) itd. Jak wynika z powyższego, wnioskowanie to polega między innymi na ustaleniu zbioru stanów eksploatacyjnych, w których śruba nastawna może się znajdować, daje więc ona wstępną diagnozę eksploatacyjną. Aby taka diagnoza była wiarygodna, wymagane jest rozpoznanie i opis odpowiednich relacji strukturalnych, stanowiące związki między właściwościami struktury śruby nastawnej a jej właściwościami eksploatacyjnymi. W tym postępowaniu mogą być także popełniane błędy.

Wnioskowanie eksploatacyjne

Wnioskowanie eksploatacyjne umożliwia określenie przydatności użytkowej bądź obsługowej śruby nastawnej, a więc wnosi informacje o jego przydatności (zdatości) eksploatacyjnej z uwzględnieniem kosztów użytkowania i obsługi. Diagnoza zawiera zatem informację o tym, do jakich zadań może być zastosowana śruba nastawna.

W wyniku tego wnioskowania przedstawione jest porównanie potencjalnych możliwości (potencjału eksploatacyjnego) śruby nastawnej z potrzebami wynikającymi w związku ze zgłoszonymi zadaniami do realizacji (ruch manewrowy, ruch marszowy). Aby opracować taką diagnozę, znane muszą być zadania, do których wymagane jest zastosowanie śruby nastawnej, gdyż zadanie te ściśle precyzują potrzeby w zakresie funkcjonowania śruby z uwzględnieniem jej sterowania w spodziewanych (przewidywanych) warunkach jej użytkowania oraz w przewidywanym czasie realizacji tego zadania. Więc wnioskowanie eksploatacyjne jest finalną diagnozą eksploatacyjną. Diagnoza, aby była wiarygodną, podobnie jak poprzednie, wymaga rozpoznania i opisanie odpowiednich relacji, stanowiących związku między odpowiednimi wymogami eksploatacyjnymi a wymogami wynikającymi z tego, aby oczekiwane zadanie mogło być zrealizowane. W formułowaniu tej diagnozy także mogą być popełniane błędy.

Jak wynika z opisanych wnioskowań i możliwych popełnianych błędów należy brać pod uwagę fakt, że mogą się one sumować. Będą one tym większe, im więcej stanów śruby nastawnej zawartych jest w zadaniu diagnostycznym. Nabiera to istotnego znaczenia, gdy potrzebna jest dokładniejsza diagnoza tzn. diagnoza o wysokiej wiarygodności. Jest to bardzo istotne w przypadku rozpatrywanych stanów technicznych, które z tego właśnie powodu rozpatrywane są jako trzy klasy stanów technicznych śruby nastawnej:

- stan pełnej zdatności
- stan częściowej (niepełnej zdatności)
- stan niezdatności.

Diagnoza o stanie śruby nastawnej, która generowana jest przez system diagnozujący z uwagi na jej przydatność eksploatacyjną podzielona jest ogół na użytkową i obsługową. Diagnoza użytkowa to informacja diagnostyczną, która precyzuje zdolność śruby nastawnej do wykonania zadań zgodnie z jej przysposobieniem w fazie projektowania i wytwarzania. Aby sformułować diagnozę użytkową, należy opracować zagadnienia, które odpowiedzą na pytania:

- czy śruba nastawna jest zdatna do wykonania zadania?
- do jakich zadań śruba nastawna jest zdatna?
- w jakim stopniu śruba nastawna jest zdatna?
- czy aktualny stan śruby nastawnej gwarantuje opłacalność jej zastosowania?
- jakie kwalifikacje musi posiadać osoba, która będzie użytkować śrubę nastawną?
- w jakich warunkach będzie użytkowana śruba nastawna?

Uzyskane odpowiedzi na powyższe pytania umożliwią użytkownikowi śruby nastawnej podjęcie decyzji eksploatacyjnych, zależnie od tego:

- czy zidentyfikowany stan śruby nastawnej umożliwia jej użycie (zastosowanie);
- czy najpierw należy odnowić aktualnie zidentyfikowany stan śruby nastawnej, następnie jej użycie;
- czy można zastosować śrubą nastawną do wszystkich lub tylko niektórych zadań;
- czy można użytkować śrubę nastawną we wszystkich lub tylko niektórych warunkach do realizacji zadań, do których była przysposobiona w fazie projektowania i wytwarzania;
- czy zastosowanie śruby nastawnej wymagać będzie odpowiedniego innego sterowania, a jeśli tak, to jakiego;
- czy są wystarczające kwalifikacje użytkownika i jakie powinny być, itd.

Diagnoza obsługowa, jest informacją diagnostyczną, precyzującą zdolność śruby nastawnej do odzyskania utraconej przydatności użytkowej. Podobnie jak wyżej opisane uwarunkowania, sformułowanie diagnozy obsługowej wymagać będzie odpowiedzi na pytania:

- czy śruba nastawna jest zdalna do obsługi?
- do jakich obsług (jakiego zakresu czynności obsługowych) śruba nastawna jest zdalna?
- aby odtworzyć wymagany stan, jakie należy wykonać czynności obsługowe?
- kto powinien ten stan odtwarzać i w jakich warunkach technicznych powinno być to wykonywane?
- czy jest opłacalne odtwarzanie tego stanu?

Uzyskanie odpowiedzi na wymienione pytania umożliwia osobie obsługującej podjęcie decyzji eksploatacyjnych zależnie od tego:

- czy odnawiać śrubę nastawną i jakie czynności należy wykonać aby jej stan odnowić,
- czy odnowienie stanu śruby nastawnej jest opłacalne (jeśli nie śruba nastawna powinna być poddana likwidacji),
- czy śruba nastawna może być obsługiwana w istniejących warunkach, a jeśli nie, to w jakich,
- czy kwalifikacje osób obsługujących śrubę nastawną są wystarczające i jaki być powinny,
- czy śruba nastawna o odnowionym stanie może być ponownie zastosowana do wszystkich zadań, do których została przysposobiona w fazie projektowania i wytwarzania, czy tylko niektórych spośród nich, a jeśli tak, to których.

Przedstawiona koncepcja wskazuje, że proces $\{C(\mathcal{G}) : \mathcal{G} \geq 0\}$ posiada wartości (stany) odpowiadające badaniu diagnostycznemu i wymienionym wyżej rodzajom wnioskowania, a czas trwania tych rodzajów wnioskowania odpowiada realizacjom tych stanów. Jak z tego wynika jest to proces klasy: dyskretny w stanach i ciągły w czasie. A przy tym oczywistym jest, że proces ten można uznać za proces semimarkowski.

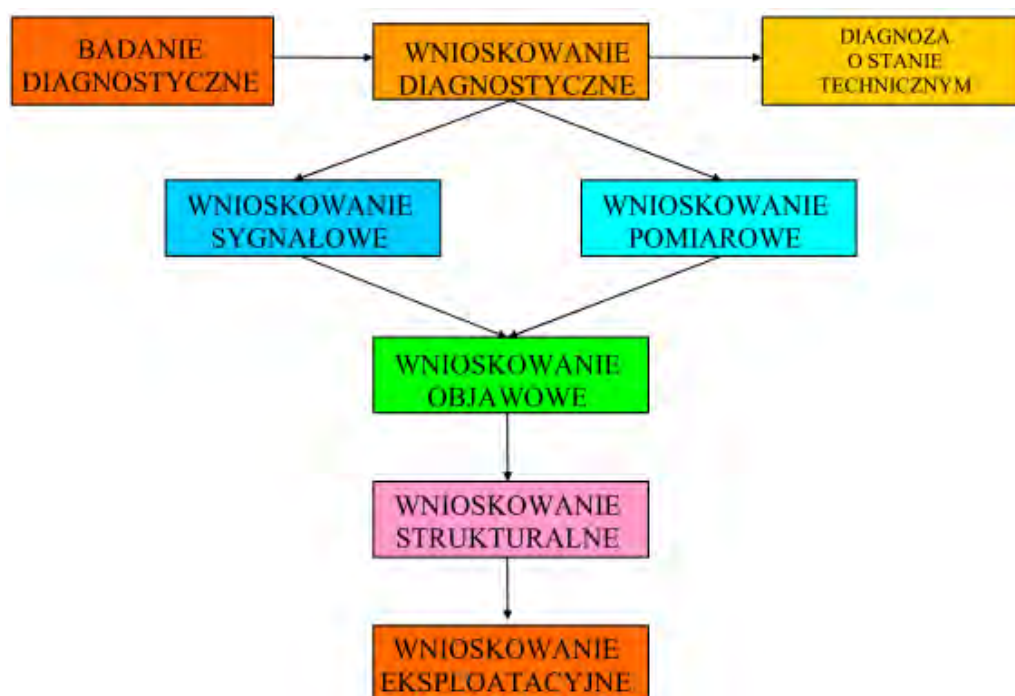
Powyższe rozważania wskazują na to, że wnioskowanie diagnostyczne umożliwiające opracowanie diagnozy o stanie technicznym śruby nastawnej, może przebiegać dwutorowo, co zobrazowane zostało na rys. 3.22 [43, 45, 58, 55, 63].

Ostatnie z rodzajów wnioskowań, tj. wnioskowanie eksploatacyjne, daje możliwość orzekania o przydatności eksploatacyjnej diagnozowanej śruby. Uzyskana diagnoza w wyniku tego wnioskowania daje informacje, czy to urządzenie jakim jest *SN* nadaje się do użytkowania i wykonania zadań, do których zostało przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania, czy też powinno zostać poddane odpowiedniej obsłudze w celu dokonania odnowy jej stanu technicznego.

W rezultacie wykonania takiego badania diagnostycznego oraz wnioskowania diagnostycznego powstaje diagnoza o stanie technicznym śruby. Stosownie do rodzaju zastosowanego wnioskowania można uzyskać diagnozy: sygnałowe, pomiarowe, objawowe, strukturalne oraz eksploatacyjne. Racjonalne sterowanie procesem eksploatacji śruby nastawnej, także innych urządzeń siłowni okrętowej jest możliwe tylko wtedy, gdy zostanie opracowana (sformułowana) diagnoza eksploatacyjna.

Wnioskowanie diagnostyczne, dokonane według jednej ze ścieżek zgodnie z propozycją przedstawioną na rys. 3.22. może mieć zastosowanie zarówno w diagnostyce klasycznej, jak również nieklasycznej, uproszczonej (asocjacyjnej). W diagnostyce klasycznej rozpatrywane są związki między parametrami konstrukcyjnymi urządzeń (*SDN*)

a parametrami diagnostycznymi. W przypadku tak złożonych urządzeń jak śruby nastawne diagnostyka ta nie ma istotnego znaczenia, ponieważ nie jest możliwe opracowanie analitycznych modeli diagnostycznych tego rodzaju śrub napędowych. W diagnostyce uproszczonej (nazywanej asocjacyjną) rozpatrywane są związki między wyróżnionymi stanami urządzeń jako *SDN* (zależnymi od wartości parametrów ich struktury konstrukcyjnej) a parametrami diagnostycznymi, umożliwiającymi rozróżnienie tych stanów. Niezależnie od rodzaju zastosowanej diagnostyki (klasyczna, asocjacyjna) w każdym z wymienionych rodzajów wnioskowania diagnostycznego mogą być (i z reguły są) popełniane błędy. Błędy popełnione w każdym z wspomnianych rodzajów wnioskowania mogą się kumulować. Ponadto są tym większe, im więcej stanów *SDN* zawartych jest w zadaniu diagnostycznym. Ich znaczenie jest tym większe, im potrzebna jest dokładniejsza diagnoza (czyli diagnoza o większej wiarygodności). Fakty te powodują, że najczęściej rozpatrywane są trzy klasy stanów technicznych *SDN*: pełnej zdatności, częściowej (niepełnej) zdatności i niezdatności.



Rys.3.22 Schemat wnioskowania diagnostycznego umożliwiającego opracowanie diagnozy o stanie technicznym śruby nastawnej (*SDN*) siłowni i tym samym podjęcie decyzji eksploatacyjnej [58]: śruba „zdatna”, „częściowo zdatne”, bądź „niezdatne” do zastosowania zgodnie z przeznaczeniem

Sterowanie automatyczne działaniem (pracą) śruby o skoku nastawnym będącej systemem, sterowanym (*STN*) i diagnozowanym (*SDN*), powinno być nadzorowane przez system diagnozujący (*SDG*), sprzężony z systemem sterującym (*ST*). Sprzężenie takie umożliwia oddziaływanie systemu sterującego na śrubę według diagnoz wygenerowanych przez system diagnozujący i kształtowanie stanów energetycznych śruby stosownie do zmian jego stanu technicznego i zaprogramowanych, (z uwzględnieniem tego stanu) faz sterowania. Opracowanie takiego systemu diagnostycznego wymaga zbudowania modelu diagnostycznego śruby, w którym byłyby zawarte zarówno potrzeby identyfikacji stanów technicznych i energetycznych danej śruby, jak również kontroli (nadzoru) funkcjonowania systemu sterującego pracą śruby. Ze względu na oddziaływanie, na wszystkie wspomniane systemy, czynników destrukcyjnych, opracowane według przyjętych zasad program i

algorytmy sterowania powinny być korygowane w zależności od aktualnych stanów, w których się te systemy znajdują.

Koncepcja diagnozowania śruby o skoku nastawnym może być przedstawiona na przykładzie diagnozowania stanów silnika spalinowego [58]. Do opracowania tej koncepcji niezbędny jest model diagnostyczny śruby, który może być podobnie rozumiany jak model silnika spalinowego.

Rozpoznawanie i przewidywanie stanów technicznych i energetycznych śrub, a tym samym ich procesu eksploatacji wymaga zastosowania odpowiedniego systemu diagnostycznego (SD), adekwatnego do potrzeb sterowania [1, 2, 4, 19, 24, 28, 58, 63]. Brak takiego SD uniemożliwia uzyskanie informacji, które potrzebne są do wykorzystania zaproponowanego w rozdziale 4 sposobu sterowania procesem eksploatacji śrub. System ten tworzą: zbiór elementów tego systemu ED i relacje R istniejące między nimi, a więc w ujęciu teoriomnogościowym:

$$SD = \langle ED, R \rangle$$

przy czym:

$$ED = \{PdD, \acute{S}D, PmD\}$$

$$R = \{R_k, R_f, R_n, R_d\}$$

gdzie:

SD – system diagnostyczny, ED – elementy SD , R – struktura SD , PdD – podmiot diagnozy, $\acute{S}D$ – środki diagnozowania, PmD – przedmiot diagnozy, R_k – struktura konstrukcyjna, R_f – struktura funkcjonalna, R_n – struktura niezawodnościowa, R_d – struktura diagnostyczna.

Podmiotem diagnozy (PdD) może być człowiek lub zespół ludzi realizujący proces diagnostyczny, opracowujący diagnozę i wykorzystujący ją w procesie decyzyjnym. Środkami diagnozowania ($\acute{S}D$) są narzędzia diagnozy, do których zalicza się metody i środki techniczne diagnostyki technicznej wraz z oprogramowaniem, a więc:

$$\acute{S}D = \{MB, TP, UD, TD, AD, DG, PG, GN\}$$

gdzie:

MB – metody diagnozowania, TP – technologia pomiarów, UD – urządzenia diagnozujące (pomiarowe), TD – technologia przetwarzania danych i opracowania diagnozy, AD – algorytmy diagnostyczne, DG – diagnozer, PG – prognozer, GN – genezer.

Elementy $\acute{S}D$ są z reguły złożone. W ujęciu formalnym można je przedstawić jako zbiory. Na przykład urządzenia diagnozujące (UD) stanowią zbiór:

$$UD = \{C, P, A, L, S, J\}$$

natomiast algorytmy diagnostyczne (AD) – zbiór

$$AD = \{ADg, ADz, APr, AGn\}$$

gdzie:

C – czujniki, P – przewody, A – analizatory sygnału, L – urządzenia logistyczne, S – sygnalizatory, J – rejestratory, ADg – algorytmy diagnozowania, ADz – algorytmy dozoru, APr – algorytmy prognozowania, AGn – algorytmy genezowania.

Przedmiotem diagnozy (PmD) jest na ogół, śruba napędowa jej $MZSS$, MOS , bądź NSN , SR , lub proces eksploatacji tego silnika bądź śruby, ale w ogólności PmD mogą

stanowią czynniki energetyczne, a także poszczególne systemy hydrauliczne, śruby. Wobec tego należy przyjąć, że

$$PmD = \{SN, MOS, MZSS, NSN, CH, SR\}$$

gdzie:

SN – śruba nastawna, *MOS* – mechanizm obrotu skrzydeł śruby, *MZSS* – mechanizm zmiany skoku śruby, *NSN* – nadajnik śruby nastawnej, *CH* – ciecz hydrauliczna, *SR* – suwak rozrządu

Przedmiot diagnozy (*PmD*) jest systemem diagnozowanym (*SDN*), natomiast system diagnozujący (*SDG*) stanowią podmiot diagnozy (*PdD*) i środki diagnozowania (*ŚD*). Wynika z tego, że system diagnostyczny śruby o skoku nastawnym, podobnie jak silnika spalinowego może być określony następująco:

$$SD = \langle SDN, SDG, R \rangle$$

Relacje *R* (struktura *SD*) tworzą związki przyczynowo-skutkowe, które można przykładowo scharakteryzować następująco: opracowany model diagnostyczny śruby (*MDS*) implikuje zastosowanie ściśle określonego *SDG*, do którego powinien być przysposobiony (najlepiej już w fazie projektowania i wytwarzania) śruba jako *SDN*.

Schemat cybernetyczny tworzenia takiego modelu (*MDS*) jest taki sam jak dla silnika spalinowego. Schemat taki przedstawiono na rys. 3.23. Model diagnostyczny śruby o skoku nastawnym, podobnie jak silnika (*MDS*) zależy od wielu czynników (ilości i rodzajów stanów, do rozpoznania których należy doprowadzić, możliwości technicznych, ekonomicznych i organizacyjnych realizacji wymaganego procesu diagnozowania, itd.). Mogą być zatem różne koncepcje diagnozowania śruby i tym samym jej procesu eksploatacji. Wszystkie one jednak uwzględniają jedną z dwóch metod diagnostycznych: klasyczną lub nieklasyczną nazywaną asocjacyjną [29 58, 63].

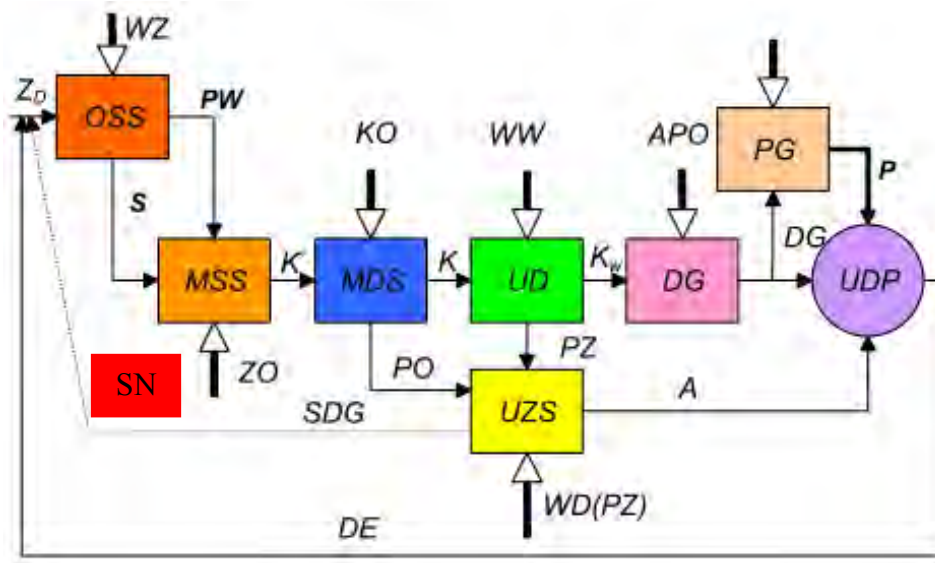
W przypadku wykorzystania klasycznej metody diagnostycznej, model diagnostyczny śruby może być w ujęciu semantycznym rozumiany następująco:

$$MDS(kl) = \langle W, P_w, K, \varphi, \psi, P, \Pi, Z, E, N, \Phi_f \rangle$$

gdzie:

- *MDS(kl)* – model diagnostyczny śruby umożliwiający zastosowanie klasycznej (*kl*) metody diagnostycznej;
- $W = \{w_j ; j = 1, 2, 3, \dots, J\}$ – zbiór wyróżnionych stanów technicznych;
- $P_w = \{p_{wj} ; j = 1, 2, 3, \dots, J\}$ – zbiór prawdopodobieństw określających wiarygodność diagnozy, że pojawił się stan w_j ($j = 1, 2, 3, \dots, J$);
- $K = \{k_i ; i = 1, 2, 3, \dots, I\}$ – zbiór parametrów diagnostycznych umożliwiających rozróżnianie stanów $w_j \in W$
- $\varphi: W \rightarrow K$ – odwzorowanie zbioru W w zbiór K , o $P_\varphi = p(k_i / w_j)$
- $\psi: K \rightarrow W$ – odwzorowanie zbioru K w zbiór W , o $P_\psi = p(w_j / k_i)$
- $P = \{p_j ; j = 1, 2, \dots, J\}$ – zbiór prawdopodobieństw zajścia stanów $w_j \in W$;
- $\Pi = \{\pi_{ij} ; i = 1, 2, 3, \dots, I ; j = 1, 2, 3, \dots, J\}$ – zbiór prawdopodobieństw jednoczesnego zajścia stanu $w_j \in W$ ($j = 1, 2, 3, \dots, J$) oraz zmiany parametru diagnostycznego $k_i \in K$ ($i = 1, 2, 3, \dots, I$)
- $Z = \{z_l ; l = 1, 2, 3, \dots, L\}$ – zbiór zasileń (energia, materiał);
- $E = \{e_m ; m = 1, 2, 3, \dots, M\}$ – zbiór sterowań;

- $N = \{n_v ; v = 1, 2, 3, \dots, V\}$ – zbiór zakłóceń (nieznanych oddziaływań, także losowych);
- $\Phi = \{\epsilon_f ; f = 1, 2, 3, \dots, F\}$ – zbiór kryteriów efektywności diagnozy.



Rys. 3.23 Schemat tworzenia MDS i jego przykładowego wykorzystania:

ZD – zasilanie, WZ – warunki zewnętrzne, SN – śruba nastawna, S – stany śruby nastawnej, PW – procesy wyjściowe, MSS – model stanów śruby nastawnej, ZD – zadanie diagnostyczne, K^* – sygnały diagnostyczne, MDS – model diagnostyczny śruby nastawnej, KO – kryteria odwzorowania diagnostycznego, K – parametry diagnostyczne, PO – program zmian obciążenia, PZ – parametry zabezpieczenia, WW – wartości wzorcowe K, K_w – wyniki sprawdzeń, UD – urządzenie diagnozujące, DG – diagnozer, APD – algorytmy i programy diagnostyczne, D – diagnoza, PG – prognozer, KP – kryteria prognozy, P – prognoza, UDP – użytkownik diagnozy i prognozy, UZS – układ zabezpieczeń śruby, A – sygnał alarmowy, WD(PZ) – wartości dopuszczalne PZ, SOG – sterowanie obciążeniem w stanach granicznych, DE – decyzje eksploatacyjne (użytkowe i obsługowe)

Zastosowanie klasycznej metody diagnostycznej wymaga opracowania analitycznych zależności stanów śruby od parametrów diagnostycznych. Uzyskanie takich funkcji nie jest łatwe ze względu na konieczność wykonania odpowiednich badań, technicznie trudnych oraz długotrwałych i kosztownych a przy tym opracowania niezwykle złożonych związków analitycznych odwzorowujących relacje między parametrami struktury konstrukcyjnej śruby a parametrami diagnostycznymi, ujawniającymi je. Wobec tego stosowana jest metoda diagnostyczna uproszczona (asocjacyjna). W przypadku zastosowania jej zamiast wspomnianego modelu $MDS(kl)$ należy opracować model $MDS(up)$, który w ujęciu semantycznym może być rozumiany następująco:

$$MDS(up) = \langle S, P_w^*, K^*, \varphi^*, \psi^*, P^*, \Pi, Z, E, N, \Phi_f \rangle$$

przy czym:

$$S = W, K^* \subset K, S = \{s_1, s_2, s_3\}$$

$$S_1 : w_j \quad (j = 1, 2, \dots, a), \quad S_2 : w_j \quad (j = a+1, a+2, \dots, b), \quad S_3 : w_j \quad (j = b+1, b+2, \dots, J)$$

gdzie:

$MDS(up)$ – model diagnostyczny śruby umożliwiający zastosowanie uproszczonej (up) metody diagnostycznej; S – zbiór stanów technicznych śruby o interpretacji:

s_1 – stan pełnej (całkowitej) zdatności, s_2 – stan zdatności częściowej; s_3 – stan niezdatności pełnej (całkowitej), lub $S = \{s_{1-2}, s_3, s_4\}$

Stosowanie uproszczonej metody diagnostycznej (asocjacyjnej) jest możliwe dlatego, że uzasadnione jest przyjęcie następującego twierdzenia:

jeżeli zgodnie z przyjętym kryterium podziału stanów dowolnej śruby, określone jego stany w dwóch różnych chwilach są sobie bliskie, to bliskie są również sygnały diagnostyczne wysyłane przez tą śrubę w tych samych dwóch chwilach i odwrotnie.

Sygnal diagnostyczny jest wektorem wartości parametrów diagnostycznych zarejestrowanych przez UD SDG podczas diagnozowania stanu technicznego SDN [21, 23 46, 49, 53].

Założenie to może być odniesione do różnych śrub:

jeżeli określone zgodnie z tym samym kryterium stany różnych śrub tego samego typu w tej samej chwili są sobie bliskie, to bliskie są także generowane przez nie w tej samej chwili ich sygnały diagnostyczne i odwrotnie.

Zgodnie z tymi założeniami obowiązuje zasada, według której SDG kwalifikuje badany stan techniczny śruby (SDN) do tej klasy stanów diagnostycznych wzorcowych, której charakterystyczny sygnał diagnostyczny w danej chwili jest najbardziej skorelowany z sygnałem wygenerowanym przez diagnozowaną śrubę i odebrany w dowolnej chwili przez wspomniany SDG.

System diagnostyczny powinien zapewniać: diagnozę, prognozę oraz genezę w takim zakresie, który umożliwiłby racjonalny przebieg zarówno użytkowania, jak i obsługiwaną śrub. Użytkowanie jako uporządkowany zbiór zainicjowanych i podtrzymywanych procesów umożliwiających realizację celu jest działaniem pożądanym w przeciwieństwie do obsługiwaną, które jest niepożądane, ale konieczne.

Użytkowanie może być czynne lub bierne. W pierwszym przypadku śruba znajduje się w stanie eksploatacyjnym e_1 , a w drugim – w stanie eksploatacyjnym e_2 . W czasie użytkowania aktywnego powinno istnieć dozоровanie. Zapewnienie tej formy diagnostycznego działania może być uzyskane przez wykorzystanie w procesie wnioskowania diagnostycznego tylko parametrów diagnostycznych ogólnych (PDG_o), które umożliwiają ustalenie, czy śruba jest w stanie s_1 , czy też w s_2 . Wtedy można skorzystać z następującej reguły oceny stanu technicznego śruby:

jeżeli wartości parametrów diagnostycznych ogólnych (PDG_o) są w przedziałach wartości dopuszczalnych (czyli nie przekraczają ustalonych dla nich wartości granicznych), to znaczy, że śruba (S) jest w stanie s_1 ; jeżeli tak nie jest to znaczy, że S jest w stanie s_2 .

Oznacza to, że proces eksploatacji śruby $\{Y(t) : t \in T\}$ może znajdować się w stanie $z_2 = (s_1, e_1)$ lub w stanie $z_3 = (s_2, e_1)$.

Ze względu na to, że procesowi diagnostycznemu towarzyszą różne zakłócenia [1, 2, 15, 19, 22 58, 55] może się zdarzyć tak, że śruba znajdująca się w stanie s_1 zostanie uznana za śrubę będącą w stanie s_2 . W tej sytuacji, aby przeciwdziałać zakłóceniom i wynikającym z ich istnienia skutkom i zwiększyć tym samym zdolność rozdzielczą systemu diagnozującego i w związku z tym wiarygodność diagnozy, należy doprowadzić między innymi do nadmiaru informacji.

Można ją uzyskać przez wykorzystanie parametrów diagnostycznych dodatkowych, które można nazwać szczegółowymi (PDG_s). Wtedy można byłoby przyjąć zasadę, że

w przypadku, gdy wartości parametrów diagnostycznych szczegółowych (PDG_s) mieszczą się w przedziale wartości dopuszczalnych, czyli nie przekraczają wartości granicznych, to można uznać, że:

- ta część $UDSDG$, która umożliwia rejestrację wartości PDG_o jest uszkodzona,
- śrubę (SN) można nadal użytkować, jeżeli nie jest potrzebna obsługa profilaktyczna ze względu na wymagania wynikające z konieczności podjęcia określonego zadania.

Zadanie takie może być formalnie wyrażone następująco:

$$Z_d = \langle N_e, W_p, \tau \rangle$$

i interpretowane przykładowo, jako wytworzenie wymaganej siły naporu T w określonych warunkach W_p ruchu statku i w wymaganym czasie τ . Siła naporu T śruby nastawnej powinna być tak duża, aby przy określonej sile ssania ΔT mogła istnieć siła napędzająca T_N , aby mogła pokonać opór R statku, aby statek mógł uzyskać wymaganą prędkość v .

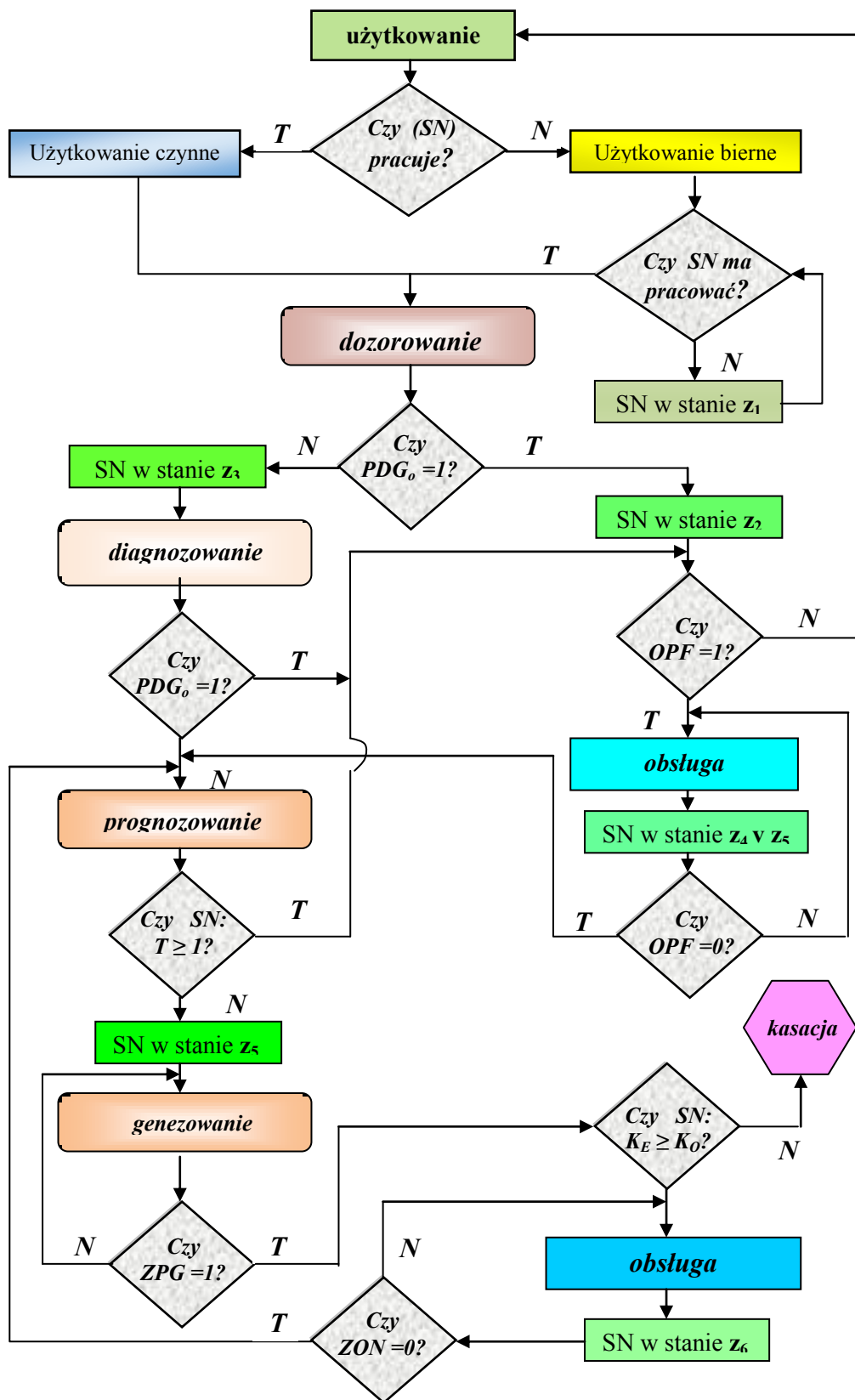
W przypadku, gdy istnieje potrzeba wykonania obsługi profilaktycznej, w celu dokonania odnowy potencjału użytkowego śruby do poziomu umożliwiającego wykonanie zadania Z_d , należy taką obsługę profilaktyczną zrealizować. Wtedy śruba może znajdować się, w stanach s_2 lub s_3 implikujących stan eksploatacyjny e_3 . Oznacza to, że proces eksploatacji śruby $\{Y(t) : t \in T\}$ może znajdować się w stanie $z_4 = (s_2, e_3)$ lub $z_5 = (s_3, e_3)$. Po zakończeniu prac profilaktycznych należy przeprowadzić prognozowanie stanów śruby, przyjmując odpowiednie kryterium, na przykład dotyczące czasu poprawnej pracy. W przypadku, gdy istotne jest to, aby czas poprawnej pracy (T_p) był większy lub co najmniej równy czasowi (t) potrzebnemu do wykonania zadania, to jeżeli:

- $T_p > t$, można uznać, że śruba jest przygotowana do użytkowania;
- $T_p < t$, należy przyjąć, że śruba jest w stanie niezdatności (a więc s_3), który implikuje stan eksploatacyjny e_4 tej śruby i tym samym uważać, że proces eksploatacji śruby $\{Y(t) : t \in T\}$ znajduje się w stanie $z_6 = (s_3, e_4)$.

W przypadku stwierdzenia stanu z_6 , należy ustalić przyczyny zajścia tego stanu. Jeśli zakres prac obsługowych zostanie zakończony, należy ocenić, czy usuwanie stwierdzonych przyczyn jest opłacalne. Trzeba zatem odpowiedzieć na pytanie, czy koszt odnowy (K_o) śruby w SRE jest co najwyżej równy kosztowi dopuszczalnemu (K_D), a więc czy $K_o < K_D$. Jeśli warunek ten jest spełniony, to wykonanie obsługi śruby jest uzasadnione. W przeciwnym razie, gdy $K_o > K_D$, odnowa jest nieopłacalna, więc śruba powinna ulec kasacji, a przy tym jej struktura konstrukcyjna demontażowi. W razie stwierdzenia, że obsługiwanie jest uzasadnione, należy doprowadzić do pełnej odnowy śruby. Po jej wykonaniu należy ponownie przeprowadzić prognozowanie.

Z kolei, gdy śruba znajduje się w stanie s_2 (co oznacza, że nie wszystkie PDG_s przyjmują wartości odpowiadające stanowi s_1), należy zidentyfikować przyczyny zajścia stanu. Następnie należy prognozować możliwości zajścia stanu s_3 . W przypadku, gdy małe jest prawdopodobieństwo zajścia tego stanu, a stan s_2 wystarczy do wykonania zadania, można śrubę dopuścić do dalszego użytkowania. W przeciwnym razie należy ponowić działanie, które zostało opisane wcześniej.

W przedstawionej koncepcji diagnozowania należy przyjąć zasadę, że śruba może znajdować się w stanie eksploatacyjnym e_2 tylko wtedy, gdy jego stan techniczny może być zaliczony do stanu s_1 . Oznacza to, że proces eksploatacji śruby $\{Y(t) : t \in T\}$ znajduje się wtedy w stanie $z_1 = (s_1, e_2)$. Realizacja tej koncepcji wymaga ponadto zastosowania systemów diagnozujących o odpowiedniej przydatności eksploatacyjnej. Koncepcja wykorzystania wszystkich wspomnianych form diagnostycznego działania została przedstawiona na rys. 3.24.



Rys. 3.24 Schemat wykorzystania form diagnostycznego działania:

SN – śruba nastawna, PDG_o – parametry diagnostyczne ogólne, PDGs – parametry diagnostyczne szczególne, OPF – obsługa profilaktyczna, ZON – zakres obsługi nieplanowej, ZPG – zakres prac związanych z genezowaniem; z₁, ..., z₆ – stany procesu eksploatacji śruby

Systemy diagnozujące (*SDG*) są obecnie produkowane przez różne firmy we wszystkich wysoko uprzemysłowionych krajach, dla określonych rodzajów i typów śrub jako systemów diagnozowanych (*SDN*) [91, 92, 93, 98, 99, 100,]. Nie można zatem wykorzystywać, w praktyce eksploatacyjnej, tych samych *SDG* do określania stanu różnych typów śrub nastawnych. Każdy typ, dla którego nie ma właściwego systemu diagnozującego, powinien być najpierw poddany odpowiedniej identyfikacji i dopiero na podstawie uzyskanych wyników z badań można dobrać najlepszy system diagnozujący spośród wyprodukowanych. Inną możliwością to zaprojektowanie, wytworzenie i wdrożenie odpowiedniego *SDG*.

Do identyfikacji stanu technicznego urządzeń siłowni okrętowych a zwłaszcza silników spalinowych i śrub napędowych należy przewidzieć metody i systemy, które są aktualnie znane. Dobrze byłoby jednak, aby w ramach wykonywania projektu studyjnego (konceptyjnego) podjąć badania nad zastosowaniem oryginalnej metody, użytecznej dla statku i ich załóg w codziennej ich eksploatacji.

Korzystając z przedstawionego schematu (rys. 3.24), należy dążyć do określenia wiarygodności diagnozy. Można ją wyznaczyć, uwzględniając to, że dowolny stan *SDN* może być rozpoznany przez *SDG* tylko wtedy, gdy [30, 58]:

- zajdzie zdarzenie *D* oznaczające diagnozowanie stanu *SDN* przez *SDG*, który nie jest uszkodzony;
- zajdzie zdarzenie *K* oznaczające pojawienie się określonego wektora wartości parametrów diagnostycznych;
- zajście zdarzenia *K* jest konsekwencją zajścia zdarzenia *S* oznaczającego pojawienie się uwzględnionego w zadaniu diagnostycznym stanu *SDN*, który powinien być zakwalifikowany do równoważnej mu klasy stanów diagnostycznych wzorcowych.

W takim przypadku wiarygodność diagnozy może być określona przez prawdopodobieństwo jednoczesnego zajścia zdarzeń *D*, *S*, *K*, według następującego wzoru [31, 32, 58, 64]:

$$P(S/K) = \frac{P(D)P(S/D)P(K/D \cap S)}{P(K)P(D/K \cap S)} \quad (3.37)$$

Zajście zdarzenia *D* nie ma wpływu na prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia *S* (co jest oczywiste, gdyż zdarzenia *S* oraz *D* są niezależne), a to oznacza, że $P(S/D) = P(S)$. W przypadku założenia, że *SDG* jest niezawodny w czasie diagnozowania, należy we wzorze (5.17) uwzględnić brak wpływu zdarzenia *D* na zdarzenie *K*, a zatem zależność $P(K/D \cap S) = P(K/S)$. Ponadto przy niezawodnym *SDG* zawsze można obserwować zdarzenie *D* przy założeniu, że zaszło zdarzenie $K \cap S$. Wobec tego przy założeniu, że *SDG* jest niezawodny w czasie diagnozowania, należy we wzorze (5.17) uwzględnić dodatkowo to, że: $P(D) = 1$ oraz $P(D/K \cap S) = 1$, wskutek czego wzór (5.17) można przedstawić w następującej formie:

$$P(S/K) = \frac{P(S)P(K/S)}{P(K)} \quad (3.38)$$

Wzór (3.38) jest zatem miarą trafności diagnozy [31].

W praktyce mogą być wykorzystywane, przy podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych, również inne wskaźniki charakteryzujące stopień rozpoznania stanu dowolnego śruby nastawnej jako *SDN*.

Przy opracowaniu diagnozy o stanie śruby za całkowicie pewną przesłankę uznawane jest zdanie K (to znaczy zdanie, że zaobserwowany został taki, a nie inny wektor sygnału diagnostycznego K). Natomiast zdanie S jest wnioskiem formułowanym na podstawie zdania K uzyskanym przy zastosowaniu wnioskowania indukcyjnego. Wnioskowanie takie przebiega według następującego schematu:

$$\frac{K, S \Rightarrow K}{S} \quad (3.39)$$

Logiczna interpretacja tego schematu jest następująca: jeżeli prawdziwa jest syntaktyczna implikacja $S \Rightarrow K$, to w przypadku pojawienia się całkowicie pewnej przesłanki K , prawdziwy jest wniosek S . Zdanie S jest w tym przypadku hipotezą, zaś zdanie K wynikiem badania diagnostycznego.

Wnioskowanie przebiegające według schematu (3.39) jest redukcyjne i nie prowadzi do wniosków pewnych, lecz jedynie prawdopodobnych. Zatem można powiedzieć, że zdanie S jest uprawdopodobnione przez zdanie K , gdyż zdanie S jest wnioskiem formułowanym na podstawie zdania K , które zostało uznane za całkowicie pewną przesłankę w procesie wnioskowania indukcyjnego. Miarami tego uprawdopodobnienia są prawdopodobieństwa określone wzorami (3.37) i (3.38).

W przypadku braku możliwości zastosowania obiektywnej miary probabilistycznej do określenia wiarygodności diagnozy, jaką są przedstawione prawdopodobieństwa matematyczne i logiczne, istnieje konieczność odniesienia pojęcia uznawania diagnozy za prawdziwą do prawdopodobieństwa subiektywnego zwanego też psychologicznym. Prawdopodobieństwo to określa stopień przeświadczenia użytkownika diagnozy o szansach spełnienia się stanu śruby (SDN), zgodnie z formułą zawartą w diagnozie, na przykład, że stan rzeczywisty s_r SDN należy do danej klasy stanów wzorcowych $s_i \in S (i = 1, 2, 3)$ lub, że stan s_r stwierdzony w określonej chwili t będzie należał do wspomnianej klasy $s_i (i = 1, 2, 3)$ po upływie przedziału czasu $(t, t + \tau)$. Uznawanie w tym przypadku diagnozy za wiarygodną jest subiektywne, gdyż zależy od wiedzy osoby opracowującej diagnozę i jej przekonania o niezawodnym funkcjonowaniu SDG śruby. Jest ono także stopniowalne, a przy tym pozbawione liczbowych miar, określających poszczególne stopnie uznawania według relacji: „ten stan śruby jest bardziej prawdopodobny niż każdy inny” lub też „ten stan śruby jest najbardziej prawdopodobny”.

Prawdopodobieństwo psychologiczne (subiektywne) odzwierciedla subiektywną ocenę użytkownika diagnozy dotyczącą stanu śruby i z tego względu może być wykorzystywane w procesie podejmowania decyzji eksploatacyjnych jedynie w przypadku posiadania, przez osobę formułującą diagnozę o stanie śruby, odpowiedniej wiedzy użytecznej.

W procesie podejmowania decyzji istotne znaczenie mają kwalifikacje i predyspozycje psychofizyczne decydenta. Szczególnie odpowiedzialne decyzje związane są z bezpieczeństwem funkcjonowania urządzeń siłowni okrętowych, zwłaszcza śrub napędowych (nie tylko o skoku nastawnym) podobnie jak silników głównych, ponieważ są one bardzo złożonymi systemami technicznymi.

3.7. Uwagi i wnioski

Powyżej opisane procesy zmian stanów eksploatacyjnych i technicznych śrub nastawnych pokazują, jak złożonym jest proces ich właściwej eksploatacji, a tym samym ich diagnozowanie, co jest niezbędne przy podejmowaniu racjonalnych decyzji eksploatacyjnych. Opisane powyżej działania diagnostyczne oraz warunki, które muszą być spełnione, by proces diagnostyczny był przydatny do podejmowania racjonalnych decyzji eksploatacyjnych, stanowią podstawę i są niezbędne do tworzenia modeli diagnostycznych jak i aparatu matematycznego opisującego ten proces diagnostyczny. Jednocześnie należy zdawać sobie

sprawę z faktu, że identyfikacja podobnych stanów technicznych i eksploatacyjnych dotycząca dwóch różnych śrub nastawnych może służyć za podstawę do podjęcia różnych decyzji eksploatacyjnych. Wynika to z faktu, że te same typy śrub nastawnych o podobnych stanach mogą być przeznaczone do różnych zadań eksploatacyjnych, jak np. zastosowanie śrub nastawnych tego samego typu do napędu statku, jako jedna śruba lub jedna z wielu w układzie napędowym (statki z napędem wielośrubowym), bądź jako śruba wykonująca swoje zadania jedynie w basenie portowym lub zastosowana do napędu statków pełnomorskich. Z tych uwarunkowań wynika też podjęcie odpowiedniej decyzji eksploatacyjnej, i tak w przypadku, gdy śruba nastawna znajduje się w stanie s_2 (zdatności częściowej), inna będzie decyzja, gdy jest ona jedynym napędem statku, a inna gdy jest jednym z kilku napędów statku.

W pierwszym wypadku podjęcie decyzji o przeprowadzeniu obsługi lub wyłączeniu jej z ruchu zależne jest od aktualnych warunków eksploatacyjnych (postój w porcie, na redzie, podróż morska, warunki pogodowe), gdyż zamiana stanu technicznego śruby nastawnej ze stanu s_1 do stanu s_2 spowoduje skrajnie różne konsekwencje. W przypadku, gdy jest ona jednym z wielu urządzeń zainstalowanych na statku, jej stan techniczny s_2 kwalifikuje ją do przeprowadzenia obsługi lub odnowy w zakresie wymaganych potrzeb obsługowych lub jej dostępności tego do przeprowadzenia tych czynności, w ostateczności wyłączenia jej z ruchu. W sytuacji uprawiania żeglugi wyłącznie w basenie portowym w porównaniu do żeglugi pełnomorskiej decyzje te też będą różne, co wynika z różnych stopni obciążenia eksploatacyjnego, czasu wymaganego do zrealizowania postawionego zadania przed tą śrubą. Wynika stąd silne uwarunkowanie tworzonego *SDG* z typem i ilością śrub nastawnych zainstalowanych na statku, ich przeznaczeniem eksploatacyjnym w tym z uwzględnieniem planowanych zadań eksploatacyjnych, do których została ona przysposobiona w fazie projektowania i wytwarzania. Z praktyki eksploatacyjnej wynika, że stan pracy i stan techniczny śruby nastawnej w zasadniczym stopniu wpływają na bezpieczeństwo statku bez względu na to, czy jest ona jednym mechanizmem, czy jednym z kilku zainstalowanych na statku. Dlatego do badań przyjęto system diagnostyczny (*SD*) składający się z pojedynczej śruby nastawnej, z pneumatycznym układem sterowania, napędzającej statek pełnomorski będącej systemem diagnozowanym (*SDN*) i przysposobionej do identyfikacji jej stanów systemu diagnozującego (*SDG*). Opis tych stanów przedstawiono w następujących rozdziałach tej pracy.

Rozdział IV

Śruba o skoku nastawnym jako obiekt diagnozowania

4.1 Uwagi wstępne

Aby umożliwić żaglowcom pływanie w bezwietrznej pogodzie, zrodził się pomysł skonstruowania pędnika, jakim była śruba napędowa. Jest to rodzaj okrętowego pędnika śrubowego, natomiast śruba nastawna zrodziła się niemal równocześnie z wynalazkiem samej śruby [17, 42, 49]. Zastosowanie jej do napędu głównego zwiększyło manewrowość statku, natomiast możliwość ustawienia płatów w tak zwaną chorągiewkę znacznie zmniejszyło opory podczas pływania pod żaglami. Ponadto możliwość dowolnego ustawienia płatów (w ramach konstrukcyjnie dopuszczalnego kąta obrotu) umożliwiało osiąganie bezstopniowej zmiany prędkości statku i dowolną jej wartość podczas ruchu manewrowego, jak też dopasowanie optymalnych nastaw odpowiadających zmiennym warunkom pływania. Wszystkie te możliwości wynikają z konstrukcji śruby nastawnej, która stanowi złożony obiekt techniczny. Jej niewątpliwe zalety, jako pędniki statków o specjalnym przeznaczeniu, były czynnikiem sprawczym ciągłych ewolucji w ich budowie. Podczas procesu ich użytkowania podlegają one zmiennym warunkom zewnętrznym, w jakich wykonują swoje zadania, oraz wymuszeniom wynikającym z czynności obsługowych jak i procesom zachodzącym w nich samych podczas użytkowania, a więc procesom sterowalnym (to znaczy takim, na które użytkownik ma wpływ) oraz procesom niesterowalnym (czyli takim, na które użytkownik nie ma wpływu).

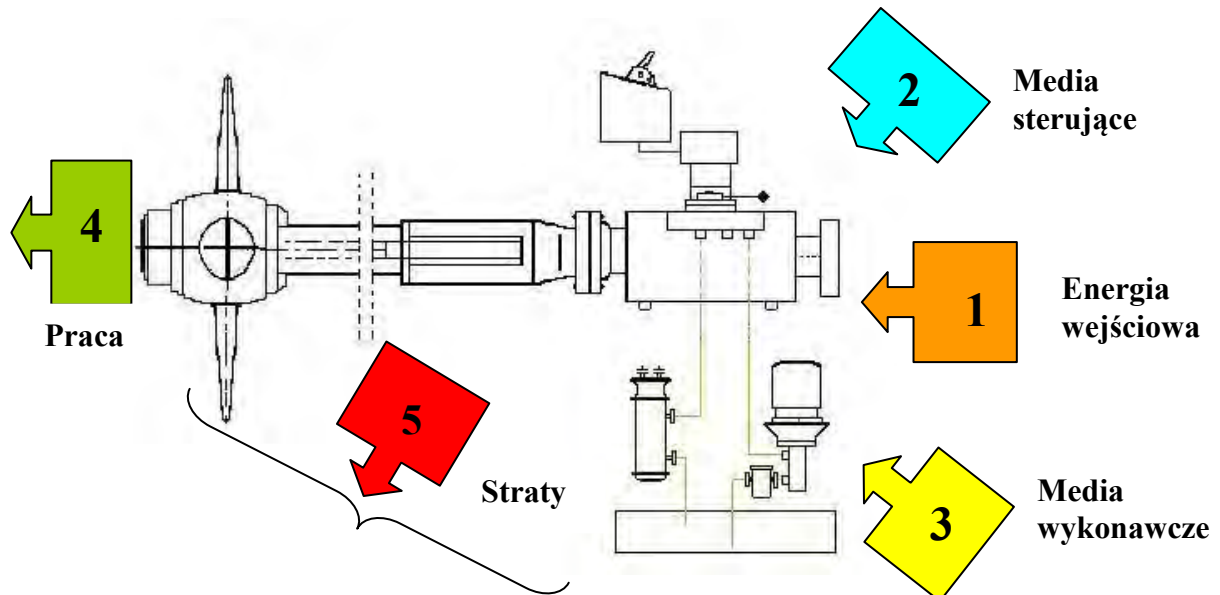
Na rysunku 4.2 pokazano uwarunkowania, jakim podlega SN, którą stanowi zespół śruby nastawnej, a co za tym idzie też i wieloaspektowość oceny stanu technicznego tego mechanizmu. Racjonalne sterowanie procesem eksploatacji zespołem śruby nastawnej, jak już wspomniano, podlega wielu czynnikom, a ponadto priorytetom przyjętych przez decydentów, (wymogi armatora, projektowanie) i powinno być wspomagane dostępnymi systemami diagnostycznymi.

4.2 Właściwości techniczno – eksploatacyjne śrub nastawnych

4.2.1 Ogólna identyfikacja śruby nastawnej jako obiektu badań

Przeprowadzony test porównawczy 04.04.1845 napędu statku Aleuto wyposażonego w koło łopatkowe i statku Ratler wyposażonego w śrubę nastawną, wykazał bardzo istotne zalety zastosowania tych ostatnich pędników do napędu statków. Ich walory użytkowe zostały docenione przez admiralicję wojenną i armatorów, co spowodowało udoskonalanie ich konstrukcji, a tym samym i osiąganych wyższych sprawności napędowych. Ciągły rozwój tego rodzaju pędników aż do chwili obecnej przynosi nowe rozwiązania, oraz wyjaśnia wiele zagadnień eksploatacyjnych, jak np. „śpiewanie śruby”, rozwiązania pomniejszające erozję kawitacyjną, sposoby przeciwdziałania drganiom generowanym przez SN, nowego rodzaju uszczelnienia na wprowadzeniu oleju sterującego o wysokim ciśnieniu do obracającego się wału śrubowego, co zasadniczo zmienia rozwiązania konstrukcyjne tych pędników, możliwość automatyzacji napędów ze śrubą nastawną dzięki zastosowaniu elementów proporcjonalnych automatyki, wcześniej pneumatyczne, aktualnie przeważnie elektryczne. Rozwój konstrukcji śrub nastawnych umożliwił przenoszenie mocy 34 000 kW na statkach handlowych, na wojennych okrętach do 37 000 kW, natomiast aktualnie największą śrubą nastawną wyprodukowaną w 1982 roku jest śruba nastawna firmy KHI (Kawasaki Heavy Industries Ltd) o średnicy 11 m i przenoszącą moc 11 400 kW [15].

Tak złożone technicznie pędniki wymagają w fazie eksploatacji odpowiedniego ich użytkowania i obsługi w oparciu o odpowiednie modele diagnostyczne, w celu zapewnienia ich bezawaryjnej i optymalnej pracy, przez założony w fazie projektowania okres pracy. Identyfikacji śruby nastawnej dokonano w oparciu o śrubę nastawną firmy Lips, zawierającą podstawowe bloki/podsystemy takiego zespołu (rys. 4.1), które są typowe dla niemal wszystkich rozwiązań stosowanych przez firmy takie jak, ABB Zanach, KaMeWa, Escher Wyss.



Rys. 4.1 Zespół napędowy ze śrubą nastawną traktowaną jako obiekt przepływowy o kilku wymiarach przepływu wybranych strumieni energetycznych:

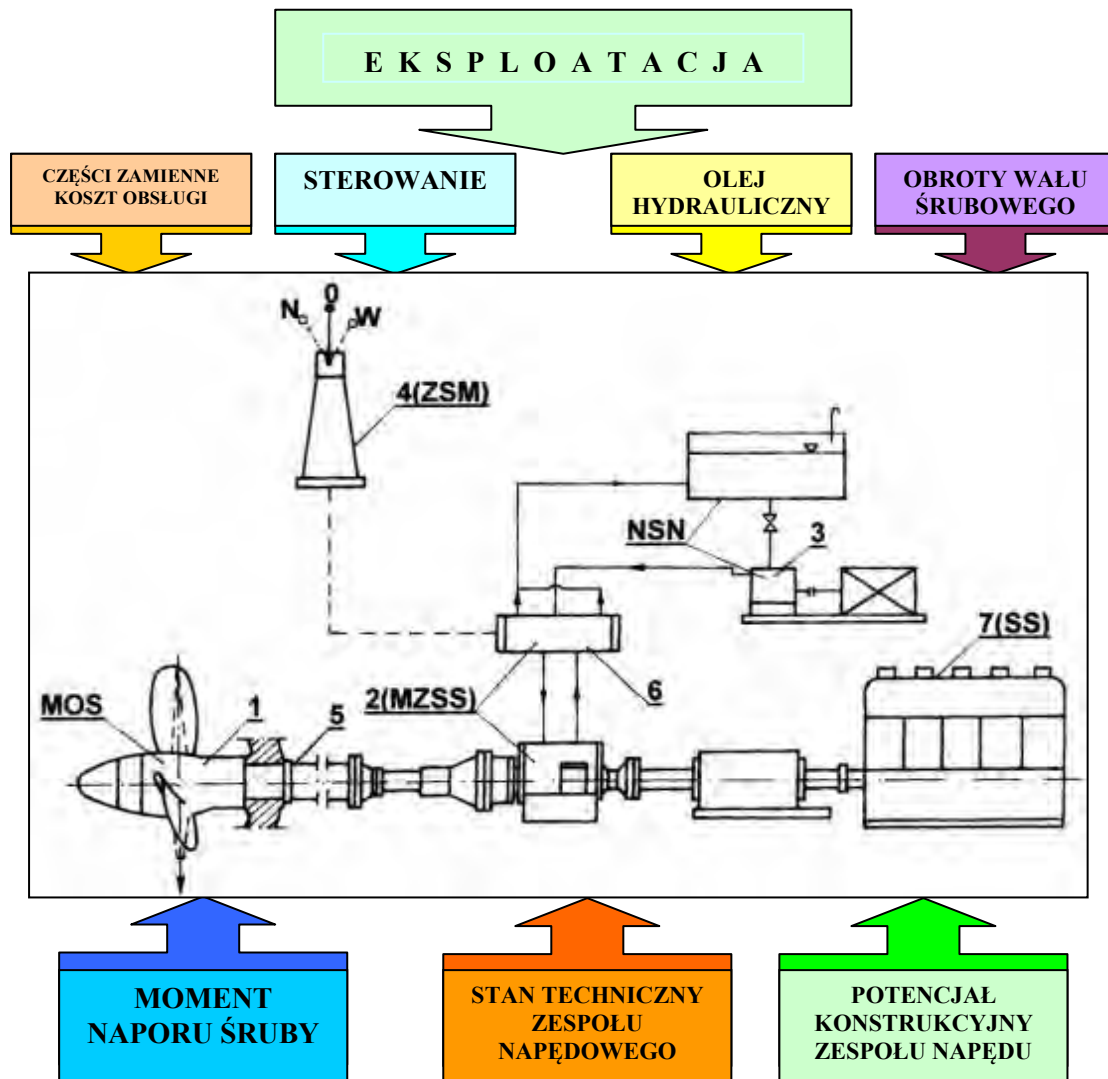
1 – strumień energii wejściowej, moment obrotowy wytwarzany przez silniki napędowe; 2 – strumień sygnałów sterujących, sygnały zadawania skoku śruby oraz sygnały od układu bezpieczeństwa współpracującego z silnikami napędowymi; 3 – strumień energii układu hydraulicznego jako układu wykonawczego/roboczego do zmiany skoku śruby i utrzymania jej w zadanej pozycji do kolejnego przesterowania; 4 – strumień energii mechanicznej mający odzwierciedlenie w mocy / naporze na płatach śruby nastawnej; 5 – strumień strat energii wewnętrznej mechanizmu

Konstrukcję śruby nastawnej f-my Lips B.V typ: H.P.C.182, na której autor prowadził badania opisano w załączniku Nr.1, gdzie przedstawiono między innymi:

- budowę podstawowych bloków funkcjonalnych (piasta śruby, rurowy wał śrubowy, blok zmiany skoku śruby nastawnej),
- zasady pracy układów wykonawczych i sterujących (układ oleju siłowego, smarowego, sprężonego powietrza),
- sterowanie skokiem śruby nastawnej w normalnej eksploatacji oraz awaryjne jej przesterowanie.

Dokumentacja techniczna dla śrub o skoku nastawnym zawiera również wytyczne eksploatacyjne, resursy obsługowe oraz stosowane media robocze i wymagania, jakim powinny odpowiadać [91, 92, 93]. Ogólne wymagania techniczno-eksploatacyjne dotyczące śrub nastawnych ujęte są w przepisach poszczególnych Towarzystw Klasyfikacyjnych, co ma na celu zapewnienie wymaganej sprawności tego mechanizmu, a tym samym i bezpieczeństwa statku [94, 95, 96, 97].

Z powyższego wynika, że zespół śruby nastawnej można rozpatrywać jako wspólny model dla wielu rozwiązań konstrukcyjnych tych mechanizmów. Ogólną budowę zespołu napędowego ze śrubą nastawną (SN) oraz, według autora, główne czynniki mające wpływ na zmianę jej stanu technicznego w fazie eksploatacji przedstawiono na rys. 4.2



Rys.4.2 Wybrane czynniki mające wpływ na eksploatację zespołu napędowego ze śrubą nastawną
 1 – piasta śruby w której znajduje się mechanizm obrotu skrzydeł (MOS); 2 – mechanizm zmiany skoku śruby; 3 – pompa nadajnika śruby nastawnej (NSN); 4 – kolumna sterownicza zdalnego stanowiska manewrowego (ZSM); 5 – uszczelnienie wału śrubowego, na którym jest osadzona śruba napędowa (1); 6 – skrzynia zaworowa (MZSS); 7 – silnik główny, czyli silnik spalinowy (SS) napędzający śrubę (1).

Tak więc na zmiany stanu technicznego SN wynikające z jej zużycia mają wpływ:

a. Przeznaczenie eksploatacyjne – napęd statku, przysposobiony do wykonywania zadań zgodnie z wymogami projektowymi na akwenach często o nieograniczonym obszarze pływania lub statków specjalistycznych

b. Warunki pracy:

- losowo zmienne warunki morskie (głębokość, falowanie, wiatr, przegłębienie, przechył) które zmieniają się w czasie oraz zmienne są wartości obciążeń działających na płyty śruby,
- losowo zmienne warunki obciążenia spowodowane obrastaniem kadłuba, załadowaniem statku, zmienne akweny pływania (twarde ciała obce pływające w polu pracy śruby takie jak bele drewniane, sieci rybackie, łachy lodowe), różna obsługa dokonywana przez załogi / serwis, także jakość części zamiennych dostarczanych na statek, zmienna jakość oleju (zawodnienie, zabrudzenie, przegrzanie oleju, wzrost zawartości zanieczyszczeń zużycia tarcowego), szybkością przesterowania śruby przy pełnej prędkości morskiej.

c. Użytkownicy zespołu napędowego ze śrubą nastawną:

- załoga powinna posiadać odpowiednie świadectwa i dyplomy, które nie zawsze gwarantują odpowiednie kwalifikacje (IMO – konwencja SCTW),
- załogi o różnej kulturze technicznej i o różnym stopniu edukacji,
- różne stany psychofizyczne załogi zależne od kołysania, długości rejsu, problemów osobistych, zamkniętej przestrzeni podczas podróży morskiej, stosunków międzyludzkich,
- eksploatacyjne – jakość dostawy części zamiennych realizowanych przez armatora, sposób dbałości o statek, czy jest to gospodarka planowa oparta na systemach zarządzania jakością (np. ISO), czy gospodarka rabunkowa do całkowitej destrukcji.

d. Prawodawstwo – spełnienie wymogów zawartych w instrukcjach, przepisach klasyfikatora, osiągane nastawy i czasy ich realizacji, limity obciążeń i ich sygnalizacja i przeciwdziałanie.

e. Obowiązujące prawo:

- główne przepisy prawne: IMO, konwencje SOLAS, Marpol, przepisy lokalne jak US Coast Gard, Baltcom – Konwencja Helsińska,
- założenia eksploatacyjne – wymagania i potrzeby armatora,
- przepisy dodatkowe – przepisy zwiększające bezpieczeństwo – przepisy towarzystw klasyfikacyjnych.

Z powyższego wynika, iż rozpatrując realne warunki pracy zespołu napędowego ze śrubą nastawną, należy brać pod uwagę nie tylko warunki wynikające z konstrukcji technicznej *SN* i wynikające z niej stany techniczne, stany fizyko-chemiczne mediów roboczych, ale również uwarunkowania eksploatacyjne, będące często niezależne jak i zależne od samej załogi statku, czyli operatora, a wynikające z obowiązujących przepisów prawnych i oczekiwań armatora.

4.2.2 Analiza funkcjonalna śruby nastavnej jako złożonego zespołu diagnozowanego

Śruba nastavna została zaprojektowana i skonstruowana do zadań eksploatacyjnych polegających na przenoszeniu energii wytwarzanej przez silnik główny na napór płatów śruby z umożliwieniem bezstopniowej nastawy (pozycji kąta wychylenia płatów śruby) a tym samym i uzyskiwania dowolnej nastawy prędkości statku przy możliwie największych sprawnościach napędowych statku – jest więc zaprojektowana do nominalnych, obliczeniowych warunków pracy (najczęściej przewidywanych i spodziewanych podczas jej eksploatacji, zakresu nastawy czasu przesterowania płatów, wartości przenoszonego momentu) i powinna być eksploatowana racjonalnie. Bierze się tutaj pod uwagę opory konstrukcyjne kadłuba, rodzaj rufy statku (symetryczna czy nie, podcięta, napęd jednośrubowy czy dwuśrubowy), moc zainstalowaną na statku, wymogi armatora dotyczące prędkości podróźnej/exploatacyjnej i maksymalnej. Ponadto istotnego znaczenia nabiera przeznaczenie statku: jak statki o dużej liczbie manewrów z krótkimi podróżami morskimi, statki pasażerskie (śruby o konstrukcji cichobieźnej i niskim poziomie drgań), statki specjalnego przeznaczenia, gdzie wymagany jest duży uciąg statku a niekoniecznie jego wysoka prędkość, dostępna przestrzeń do jej instalacji oraz najbezpieczniejszy i sprawny układ sterowania (hydrauliczno-pneumatyczny, hydrauliczno-elektryczny).

Różnice konstrukcyjne wynikają częściej z inżynierskich usprawnień i ograniczeń wynikających z prawa patentowego, niż z naukowego uzasadnienia wyboru rozwiązania konstrukcyjnego.

Porównanie parametrów pracy jest utrudnione, ponieważ stosowane przez producentów rozwiązania różnią się między sobą np.

- siłownik zmiany skoku śruby może być umieszczony [8, 17, 49]:

- na zewnątrz wału śrubowego – np. firma Saffle,
- wewnątrz wału pośredniego – np. firma Lips,

- wewnątrz piasty śruby – np. firma ABB Zamach,
- łożyskowanie płatów śrub w piasku może być:
- klasyczne (z zastosowaniem dwóch łożysk) – np. firma Escher – Wyss,
 - kołnierzone (wieńcowe) – np. firma Lips-Schelde, przy czym te ostatnie są stosowane niemal powszechnie, ale z drobnymi modyfikacjami i stosowane przez wszystkich czołowych producentów (np. ABB Zamech, KaMeWa, Lips i inne)
- mechanizm obrotu skrzydeł może być jako:
- korbowy – np. firma Escher Wyss (obecnie Sulzer-Hydro),
 - kulisowy z czopem w przesuwym wodziku – np. firma MAN B&W,
 - kulisowy z czopem w podstawie skrzydła – np. firma ABB Zamach, Lips.

Głównymi układami funkcjonalnymi śruby nastawnej, czyli takimi, których prawidłowa - praca ma istotny wpływ na efektywność eksploatacyjną są [2, 8, 17, 42, 49, 52, 62]:

- układ oleju roboczego, zapewniający pełną, płynną zmianę skoku płatów śruby nastawnej, prawidłowe smarowanie współpracujących elementów, oraz ochronę piasty przed penetracją wody zaburtowej,
- układ sterowania, zapewniający dokładne osiąganie zadanych pozycji skoku śruby nastawnej, którego poprawna regulacja sprzężenia zwrotnego chroni układ przed pulsacyjną pracą, co z uwagi na duże obciążenia występujące w układzie jest zjawiskiem wielce szkodliwym,
- układ kontroli i bezpieczeństwa, zapewnia stały monitoring parametrów pracy, co ułatwia podjęcie adekwatnej decyzji zależnie od zaistniałej sytuacji, zaś układ bezpieczeństwa zapewnia bezpieczeństwo manewrowe statku (gdy zaistnieje zanik ciśnienia oleju)
- układ chłodzenia i filtracji oleju roboczego, zapewnia właściwe warunki termiczne oleju a przez to jego parametry fizyko-chemiczne,
- układ kontroli skoku śruby z układem obciążenia silnika głównego, zapewnia ochronę silnika napędu głównego przed przeciążeniem, oraz podczas pracy zespołu napędowego w układzie „kombinator”, dla odpowiedniej nastawy manewrów ustawia zaprojektowane nastawy dawki paliwa na silniku głównym i odpowiadający tej nastawie skok śruby.

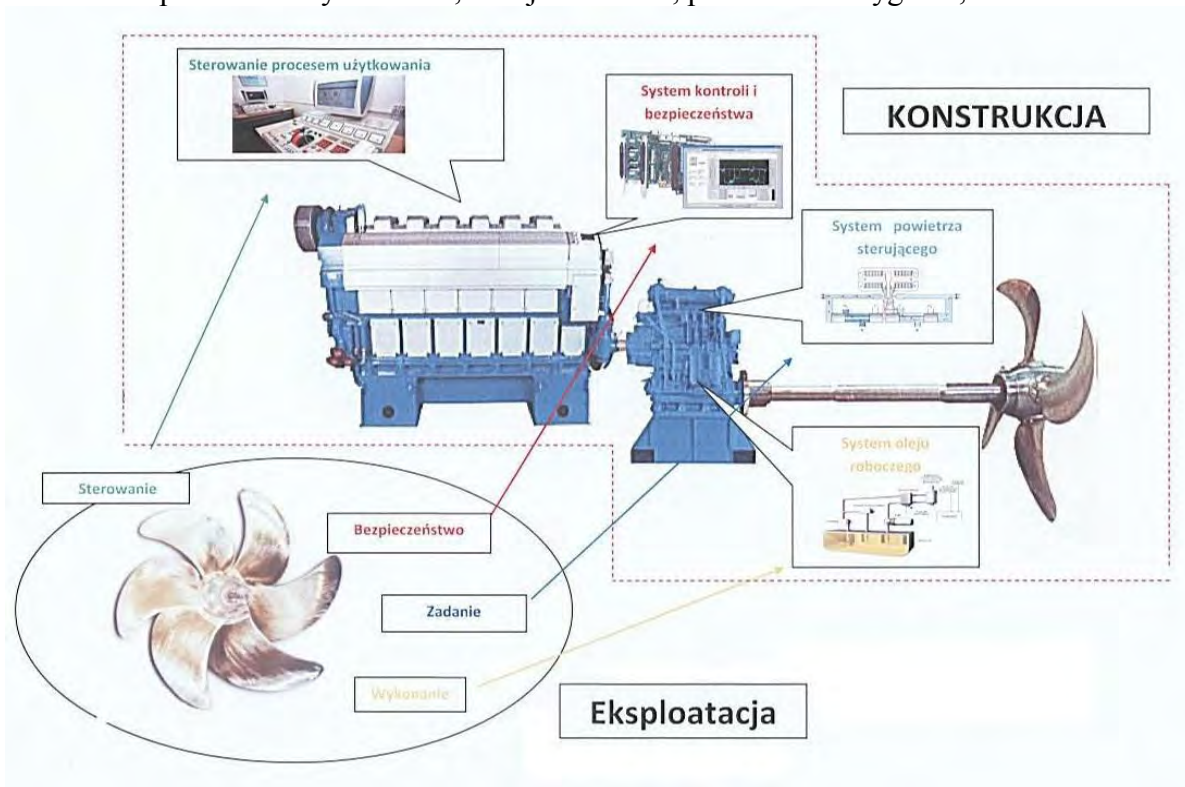
Każdemu z wymienionych układów funkcjonalnych śruby, przyporządkowano system mający zapewnić odpowiednie przygotowanie mediów roboczych, którymi ta śruba jest zasilana i obsługiwana (woda chłodząca, olej roboczy, powietrze sterujące, stabilizowany prąd układu sterowania). Wymienione układy wyposażone są w różne elementy stanowiące ich wyposażenie (pompy, sprężarki, chłodnice, filtry, układy stabilizacji i obróbki sygnałów elektrycznych, czujniki, zbiorniki, urządzenia pomiarowe układu kontrolującego jako pętla sprzężenia zwrotnego układu bezpieczeństwa). Wszystkie one współpracują ze sobą w celu uzyskania i utrzymania wymaganych parametrów wejściowych, umożliwiających odpowiednim układom wchodzącym w skład zespołu śruby nastawnej prawidłowe działanie i osiąganie przez tę śrubę oczekiwanych parametrów eksploatacyjnych.

Główne układy przygotowania i obsługi mediów śruby nastawnej przedstawione są na rys. 4.3 oraz ujęte biuletynach i dokumentacji techniczno ruchowej (*DTR*) dla tych *SN* [91, 92, 93].

Do tych układów należą:

- układ oleju roboczego: zbiorniki obiegowy i grawitacyjny, pompy, chłodnice, filtry, rurociągi, sygnalizatory poziomu ciśnienia, temperatury, mierniki prędkości przepływu, i poziomu oleju w zbiornikach,
- układ powietrza sterującego: butle sprężonego powietrza, reduktory, filtry, odwadniacze, naolejacje, zadajniki skoku, zawory automatyki pneumatycznej, podwójne wskaźniki ciśnienia,

- układ elektryczny: prostowniki, stabilizatory, przetworniki sygnału i pozycji skoku śruby, zabezpieczenia przeciążeniowe i przepięciowe, tory kablowe,
- układ procesem użytkowania, zadajniki skoku, przetworniki sygnału, wskaźniki skoku.



Rys. 4.3 Blok strukturalny i podsystemy funkcjonalne zespołu napędowego ze śrubą nastawną

Wskazane powyżej podzespoły świadczą jak złożonym jest zespół śruby napędowej statku, z jak wielu układów, różniących się funkcją, zbudowane są te zespoły i systemy przygotowania mediów roboczych, co przedstawione jest na rys. 4.3.

4.2.3 Wybór kryteriów podziału i oceny zdolności śruby nastawnej jako systemu diagnozowanego

Śruba nastawna będąca wysoce złożonym obiektem technicznym, pracującym w dwóch przestrzeniach (piasta wraz ze skrzydłami za burtą w wodzie, oraz blok zadający i wykonawczy w siłowni) wymaga ciągłego diagnozowania, w celu zapewnienia prawidłowego jej działania, wymaganego do wykonania określonego zadania.

Aby uzyskać wiarygodną diagnozę, koniecznym jest określenie wzajemnych zależności, korelację czynników wpływających na prawidłową i trwałą pracę śruby a parametrami diagnostycznymi, odzwierciedlającymi jej stan techniczny, biorąc jednocześnie pod uwagę priorytety działania w różnych stanach eksploatacyjnych tej śruby.

W związku z powyższym podzielono procesy i relacje występujące między nimi, na niezbędne w rozważaniach diagnostycznych struktury zależności, jak tribologiczna, fizykochemiczna i konstrukcyjna.

- Strukturę tribologiczną stanowią pary składające się ze współpracujących części śruby nastawnej, których parametrami mierzalnymi są geometryczne zmiany wymiarów w wyniku ich zużycia z powodu tarcia.

Zmiany tych wymiarów określają luzy pomiędzy współpracującymi częściami, a tym samym określają stan techniczny śruby (np. suwaka rozdzielacza oleju).

Układy tribologiczne występują w węzłach łożyskowania (łożyska nośne i oporowe) w połączeniach suwliwych (siłowniki zmiany skoku śruby), w miejscach pracy uszczelnień, także w miejscach małych lub miniaturowych (suwaki zaworów elektromagnetycznych, zadajników skoku, wzmacniaczy sygnałów, zaworów iglicowych). Są to elementy o różnej dostępności, a w związku z tym o różnej możliwości ich wymiany, co wpływa na koszty ich odnowy. Ponieważ są to elementy przeznaczone do precyzyjnej pracy, są istotne dla funkcjonowania śruby nastawnej, ich uszkodzenie może spowodować niekiedy poważne straty eksploatacyjne łącznie z katastrofą.

- Strukturę fizykochemiczną stanowią cechy fizykochemiczne oleju roboczego, jego czystość, która jest uwarunkowana rozmiarem zużycia tribologicznego skojarzeń ciernych, przez co wzrasta ilość zanieczyszczeń stałych w tym oleju, także zawodnienie wpływa w sposób zasadniczy na jakość pracy śruby nastawnej, oraz znacznie powiększa zużycie korozyjne elementów omywanych olejem, przyczyniając się do dalszego wzrostu zanieczyszczeń w oleju roboczym. Stan zawodnienia i zabrudzenia oleju roboczego jest możliwy do zmierzenia. Z wyników tych pomiarów możemy wnioskować o zmianie struktury chemicznej i fizycznej oleju roboczego (wypłukanie komponentów uzdatniających olej, zmiana własności fizycznych wskutek zawartości wody), co może umożliwić spodziewania się zmian w strukturze technicznej śruby nastawnej, oraz zmianie jej stanu pracy (np. wzrost gęstości oleju jako emulsji, pojawienie się niestabilnej pracy śruby nastawnej, w skrajnym przypadku może dojść do zaniku przepływu oleju roboczego przez małe elementy układu sterowania). Takie stany są dalece niebezpieczne dla dalszej pracy śruby i jej stanu technicznego, gdyż z jednej strony mogą doprowadzić do utraty manewrowości z powodu znacznego i rozległego zużycia korozyjnego elementów składowych śruby.

- Strukturę konstrukcyjną określają parametry zużycia piasty śruby nastawnej, wskutek oddziaływania środowiska, w którym pracuje. Zjawisko kawitacji, występujące podczas pracy śruby, jest głównym powodem ubytków na powierzchni płatów śruby i piasty, często o dość rozległych rozmiarach, zależnie od użytego materiału do jej wykonania oraz warunków pracy (np. kształt, prędkość obrotowa, zawartość gazów w środowisku pracy śruby). Ponieważ kawitacja zachodzi, jak wspomniano, na śrubie w czasie jej pracy, podczas ruchu statku, nie ma możliwości dokonania oględzin jej powierzchni, co stanowi poważny problem eksploatacyjny. Jednakże ten rodzaj i wielkość zużycia śruby jest możliwy do oceny, wprawdzie pośrednio, ale w sposób dający obraz jej stanu technicznego. Ubytki materiału śruby, z powodu kawitacji, generują drgania wpływające zasadniczo na pozostałe układy kinematyczne zespołu śruby, przyczyniając się do dalszego zużycia drganiowego jej elementów, które może doprowadzić do rezonowania drgań, a w konsekwencji do zniszczeń mechanicznych jej elementów konstrukcyjnych. Poprzez pomiar wielkości drgań generowanych przez śrubę podczas jej pracy i przyrównanie z wartością wzorcową (odpowiadająca wartości drgań generowanych przez śrubę nową) możemy wnioskować o rodzaju uszkodzeń śruby, nie tylko wskutek zjawiska kawitacji, ale również z powodu np. pęknięcia płata śruby. Uszkodzenia tego typu mają istotny wpływ na jakość pracy śruby nastawnej, tak więc na podstawie pomiaru wartości drgań, można zdecydować o jej naprawie, nie czekając na jej rozległe uszkodzenia. Do oceny tego stanu można zastosować metody wibroakustyczne, z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych, co wymaga jednak trwałego oczujnikowania zespołu śruby nastawnej, aktualnie możliwe do wykonania i zastosowania [6, 10, 55, 62, 77].

4.3 Obciążenie i zużycie śrub nastawnych

Projektując zespół napędowy statku, realizuje się wymagania armatora wynikające z warunków kontraktowych oraz potrzeby ekonomicznego i eksploatacyjnego uzasadnienia

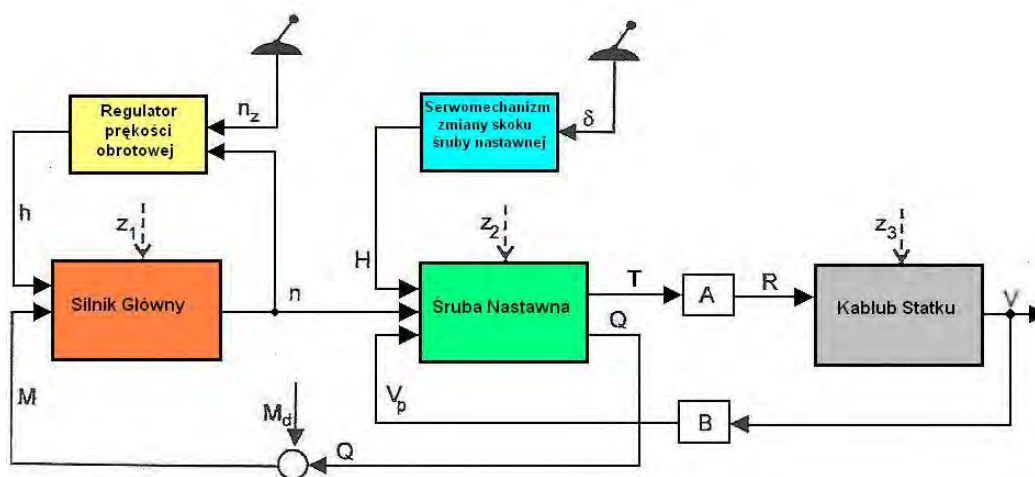
wyboru konkretnego rozwiązania, zgodnie z jego możliwościami eksploatacyjno technicznymi.

Projektowanie zespołu napędowego statku wymusza rozważenie wielu aspektów wynikających, z jednej strony z wymogów armatorskich, które są ściśle określone w kontrakcie, z drugiej zaś, uwzględnienia zmiennych warunków pływania, które z kolei są uwarunkowaniami wpływającymi na pracę zespołu napędowego.

Oczywistym jest, że śruba napędowa, niezależnie od tego, czy jest stała tzn. o skoku nie nastawnym, czy o nastawnym skoku, dobierana jest do kadłuba statku, co realizowane jest na podstawie charakterystyk kadłuba i śruby swobodnej, które są uzyskiwane z badań modelowych. Prawidłowe przeliczenia wyników z badań modelowych na rzeczywisty układ: „kadłub → śruba napędowa → silnik napędu głównego”, są podstawowym warunkiem prawidłowego doboru podzespołów, umożliwiających transformację momentu obrotowego generowanego przez silnik napędu głównego na siłę naporu płatów śruby nastawnej, przy zachowaniu maksymalnej możliwej sprawności napędowej zespołu zamontowanego na danym statku oraz zapewnieniu realizacji aspektów ekonomicznych i energetycznych wynikających z kontraktu na budowę statku.

Zespół napędowy statku jest złożonym układem energetycznym, który podlega wzajemnemu oddziaływaniu poszczególnych jego podzespołów składowych, zależnie od uwarunkowań zewnętrznych pracy, jakością procesu sterowania układem, jak również stopnia jego degradacji, wynikającej z poprawności obsługi i użytkowania aktywnego.

Przykładowy schemat blokowy zespołu napędowego statku, z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania oraz przepływu sygnałów pomiędzy jego podzespołami pokazano na rys. 4.3.



Rys.4.4 Schemat blokowy obiektu sterowania:

n_z – zadana prędkość obrotowa; n – rzeczywista prędkość obrotowa; δ – zadana wartość skoku śruby; H – rzeczywista wartość skoku śruby; h – nastawa pomp wtryskowych (dawka paliwa podawana do silnika); T – siła naporu śruby; R – opór kadłuba; M – moment obrotowy obciążający silnik; Q – moment obrotowy na stożku śruby; M_d – moment obrotowy wynikający z załączenia dodatkowych odbiorników mocy oraz oporów tarcia linii wałów; v – prędkość statku; v_p – prędkość postępową śruby; A – blok uwzględniający oddziaływanie śruby na pracę kadłuba; B – blok uwzględniający oddziaływanie kadłuba na pracę śruby; z_1, z_2, z_3 – zakłócenia wpływające na charakterystyki silnika, śruby i kadłuba.

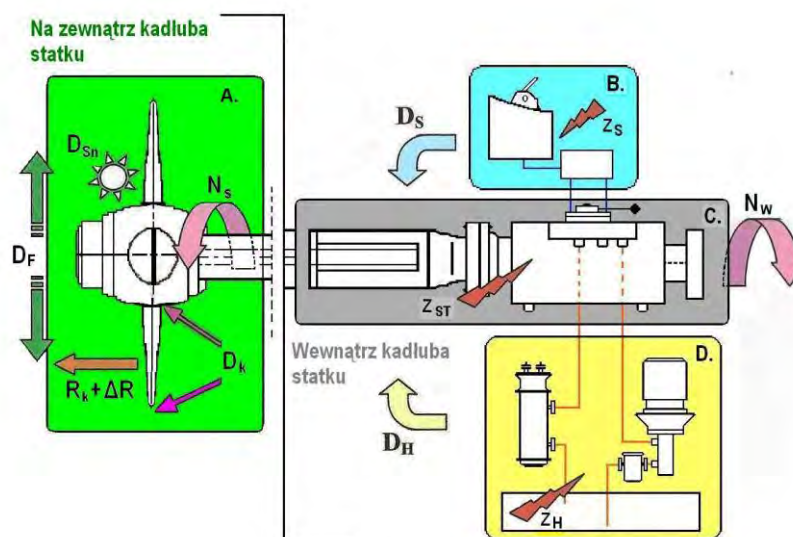
W procesie użytkowania śruby nastawnej na poszczególne jej podzespoły (MOS, MZSS, NSN) działają bardzo złożone procesy fizyko – chemiczne, wynikające z oddziaływania środowiska, jak i procesów zachodzących w nich samych. Różnorodność ich oraz liczba zmusza do eliminowania tych najmniej istotnych albowiem uwzględnianie wszystkich

uwarunkowań i zachodzących procesów spowodowałyby niepożądaną komplikację rozważań, uniemożliwiając tym samym opracowanie modelu diagnozowanego przydatnego w praktyce eksploatacyjnej.

Jednym z podzespołów układu napędowego statku jest śruba o skoku nastawnym, której stan techniczny istotnie wpływa na zdolności manewrowe statku. Przy niesprawnych podzespołach śruby o nastawnym skoku zachodzi duże prawdopodobieństwo utraty sterowności statku, jego zdolności ruchowej oraz manewrowej, a co za tym idzie niemożność wykonania zadań, jakie są przed statkiem stawiane.

Funkcjonowaniu śruby o skoku nastawnym, w okresie od jej zbudowania do chwili wycofania z eksploatacji, a więc w okresie jej użytkowania i obsługi, towarzyszą różne procesy fizyko-chemiczne. Do najistotniejszych należą te, które wynikają z procesu aktywnego użytkowania, czyli transformacji momentu obrotowego silnika napędu głównego na moment naporu na płatach śruby.

Schemat poglądowy śruby nastawnej i możliwości obciążenia wpływającego na pracę tej śruby pokazano na rys. 4.4.



Rys 4.5 Uproszczony schemat konstrukcji SN z wyszczególnieniem jej podzespołów zespołu napędowego ze śrubą nastawną oraz obciążeń wpływające na jego pracę:

A – piasta śruby z mechanizmem zmiany skoku, **B** – blok zespołu sterowania skokiem śruby nastawnej, **C** – zespół rozrzędu z zespołem rurowym, **D** – zespół transportu oleju roboczego, D_F – działanie falowania (warunki pogodowe, zanurzenie); D_{Sn} – działanie strumienia nadążającego; $R_k + \Delta R$ – opory kadłuba (konstrukcyjne i eksploatacyjne); D_K – działanie kawitacji; N_s – moment na stożku; D_S – działanie układu sterowania; D_H – działanie układu hydraulicznego; N_W – moment wejściowy (moment na sprzęgle); Z_S – zakłócenia w układzie sterowania; Z_H – zakłócenia w układzie hydraulicznym, Z_{ST} – zakłócenie stanu technicznego (zużycie tarciove, odkształcenia termo-sprężyste itp.).

Stan energetyczny śruby nastawnej, umożliwiający transformację energii mechanicznej silnika i zamianę momentu obrotowego na energię naporu na płatach śruby, uzależniony jest od działania czynników zewnętrznych, a więc środowiska pracy i wzajemnego oddziaływania podzespołów, oraz działania czynników wewnętrznych wynikających z procesów fizycznych i chemicznych zachodzących w nich samych, skutkiem użytkowania i obsługi. Uproszczony schemat konstrukcji SN z wyszczególnieniem jej podzespołów zespołu napędowego ze śrubą nastawną oraz obciążeń wpływające na jego pracę autor przedstawiał na rys. 4.5.

Do najistotniejszych oddziaływań zewnętrznych, wpływających na stan śruby nastawnej, zaliczyć należy takie, które pogarszają działanie tej śruby, oraz wpływają na jej postępującą

degradację techniczną. Do wspomnianych oddziaływań należy przede wszystkim zaliczyć: opór kadłuba statku, warunki pogodowe i rejon pływania, niejednorodne pole prędkości w kręgu pracy śruby, zjawiska kawitacji płatów śruby, porośnięcie śruby, uszkodzenie płatów śruby (zagięcia, pęknięcia), zakłócenia w procesie sterowania skokiem śruby. Opór kadłuba jest cechą przypisaną do danego statku, charakteryzują go współczynniki określające jego opór konstrukcyjny oraz dodatkowe opory eksploatacyjne. Opór ten tworzą: opory tarcia (wynikający z lepkości wody), ruch falowy, opór ciśnienia (wirowy), opór części wystających, które wynikają z kształtów geometrycznych kadłuba, części rufowej statku, jego zanurzenia. Dotyczy to statku nowego, czyli jest to stały opór konstrukcyjny, działający na pędnik. Z biegiem czasu użytkowania, stan kadłuba statku ulega degradacji, a tym samym zmienia się działająca na śrubę składowa oporu kadłuba. Pogorszenie stanu technicznego kadłuba jak jego odkształcenia, (wgięcia między wręgowe, wgięcia skutkiem działania fal), stopień skorodowania, jakość lub uszkodzenia powłok ochronnych oraz porośnięcie części podwodnej kadłuba, stanowią dodatkowe opory eksploatacyjne. Wpływają one na pogorszenie warunków pracy zespołu napędowego ze śrubą nastawną, powodując obniżenie jej sprawności napędowej, wskutek stałego przyrostu oporów w miarę upływu czasu eksploatacji. Tak więc, dla celów praktycznych, można przyjąć, że opór całkowity R_K jest sumą oporu konstrukcyjnego oraz dodatkowych oporów eksploatacyjnych ΔR :

$$R = R_K + \Delta R \quad (4.1)$$

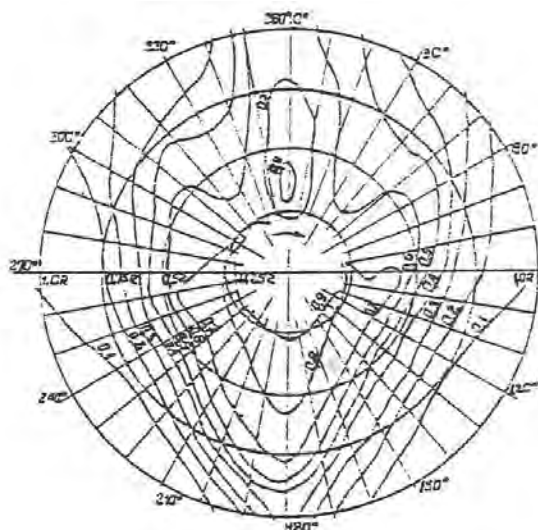
Zatem opór konstrukcyjny jest cechą statku, a opór dodatkowy / eksploatacyjny jest zmienną wpływającą na charakterystykę kadłuba wynikającą z procesu jego użytkowania.

Warunki pogodowe i rejon pływania wywierają istotny wpływ na obciążenie układu napędowego ze śrubą nastawną. Długość fali, jej kierunek kursowy względem statku powodują bądź to zanurzanie bądź wynurzanie się śruby. Oba stany niosą ze sobą zmiany obciążenia zespołu napędowego. Zanurzanie się śruby powoduje duże obciążenia płatów oraz chwilowe przeciążenia silnika napędu głównego, wynikiem czego, między innymi, może być zredukowana nastawa skoku śruby, a są to stany, które wywierają największe obciążenia mechaniczne płatów śruby nastawnej. Wynurzanie się śruby, powoduje nierównomierny rozkład sił na płatach śruby z powodu zasysania powietrza (zmiana gęstości ośrodka pracy śruby), które sprzyja powstawaniu kawitacji. Zjawiska hydrodynamiczne występujące podczas pływania po wodach płytkich, która definiowana jest jako głębokość mniejsza niż 8 zanurzeń statku, powoduje dodatkowy opór będący wynikiem oddziaływania dna. Wartość tego oporu jest zależna od stosunku średniego zanurzenia do głębokości wody pod stępką oraz szybkości statku.

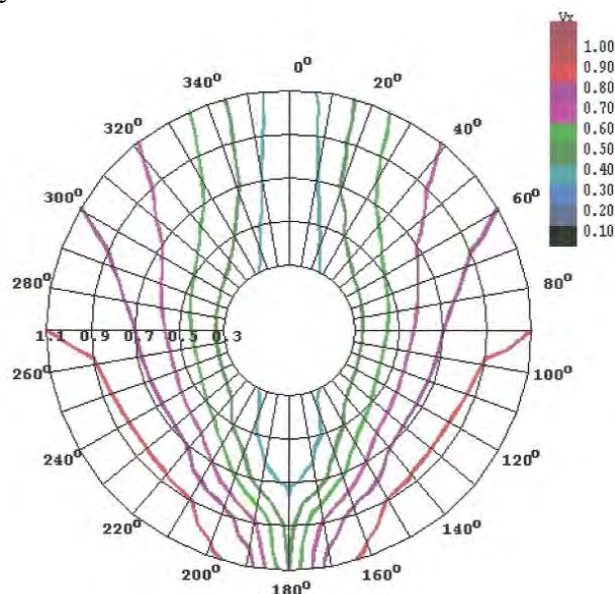
Pływanie statku w strefie tropikalnej sprzyja porastaniu kadłuba i śruby, pogarszając tym samym stan techniczny jej powierzchni, natomiast rejony zalodzone, oprócz dodatkowych oporów wynikających z łań lodowych, stanowią dla śruby, zagrożenia czysto mechaniczne. Istnieje bowiem niebezpieczeństwo połamania płatów śruby na skutek ich uderzenia w twarde bryły lodu.

Niejednorodne pole prędkości w kręgu śruby ma także niekorzystny wpływ na działanie śruby. Wraz z poruszającym się statkiem porusza się również strumień nadążający, jest to ta część wody, która, w wyniku swojej lepkości porusza się wraz z kadłubem. W dziobowej części kadłuba prędkość tego strumienia jest zerowa, i rośnie w kierunku rufowym. W tej masie wody pracuje śruba napędowa, a więc w wodzie, której prędkość jest inna niż otaczająca statek. Strumień nadążający, powstający za statkiem jest zjawiskiem bardzo złożonym, na które mają wpływ między innymi nieregularne kształty kadłuba. Rozkład prędkości wody w strumieniu nadążającym jest w każdym punkcie kręgu pracy śruby inny, jak pokazano na rys. 4.6 i rys. 4.7 [15, 42, 47, 49, 51, 52, 76].

Niejednorodne pole prędkości w kręgu pracy śruby jest główną przyczyną powstawania drgań generowanych przez śrubę, jak również powoduje różnice rozkładu sił na jej płatach. Na wartość współczynnika strumienia nadążającego mają wpływ konstrukcyjne cechy kadłuba i śruby, oraz lokalizacja śruby za kadłubem, a więc cechy te także wpływają na obciążenie zespołu śruby napędowej o nastawnym skoku.



Rys. 4.6 Warstwowy rozkład współczynnika strumienia nadążającego – rufa symetryczna, statek jednośrubowy



Rys. 4.7 Składowa osiowa prędkości w strumieniu za kadłubowym [81]

Szczególnie szkodliwe dla śrub nastawnych są zjawiska kawitacji płatów. Śruba napędowa podczas pracy wywołuje za kadłubem zmianę rozkładu ciśnień w części rufowej statku. Po stronie ssącej śruby występuje spadek ciśnienia pogarszający warunki jej pracy. Z powodu różnicy ciśnień przepływającej wody w kręgu śruby oraz jej niejednorodności zachodzi przepływ turbulentny, pojawiają się niekorzystne zjawiska kawitacji, zlokalizowane na powierzchniach szczytowych płatów śruby i przy jej piąście. Kawitacja jest powodem utraty gładkości powierzchni skrzydeł, a tym samym i obniżenia sprawności wskutek hydrodynamicznego działania miejscowych mikro zawirowań w miejscach skwitowanych, oraz jest powodem osłabienia mechanicznego płatów w wyszczególnionych miejscach.

Podczas rejsu statku występują nieraz znaczne zakłócenia w procesie sterowania skokiem śruby nastawnej. Tymczasem układ sterowania skokiem śruby nastawnej powinien cechować się stałością zadanej nastawy w całym zakresie i procesie użytkowania. Źle pracujący podzespół *SN* lub jego część, np. wskutek niewłaściwej regulacji sprzężenia zwrotnego układu sterowania, mogące powodować cykliczną zmianę nastaw śruby podczas jej pracy, powoduje zmianę obciążenia *SN*. Uszkodzenie zaś elektronicznego układu przekazania sygnału skoku śruby i jej pozycji do głównego bloku sterowania może powodować dynamiczną, skokową zmianę nastaw w zakresie wartości skrajnych, co jest czynnikiem sprawczym równoważnych zmiennych obciążeń dynamicznych śruby i jej płatów. Moment zmiany skoku śruby napędowej wywiera bowiem największy wpływ na zmianę wartości siły naporu śruby i momentu obrotowego. Tak więc stabilność zadanego skoku śruby warunkuje stan ustalony jej pracy, ponadto prędkość zmiany skoku jest tym czynnikiem, który wywołuje dynamiczne zmiany momentu na stożku śruby, mogące powodować niepożądany wzrost momentu skręcającego linii wałów z zespołem rurowym i w konsekwencji niepożądane

obciążenia tulejowego sprzęgła skurczowego (*SKF*), łączącego dwie części tego wału śrubowego.

Niekorzystne są także zakłócenia w układzie oleju siłowego roboczego i smarowego zachodzące w czasie rejsu statku. Układ oleju roboczego winien być całkowicie szczelny, nie powinien zawierać wody ani nie powinien być napowietrzany, gdyż powoduje to niejednorodność oleju roboczego. Taka niejednorodna struktura oleju roboczego jest przyczyną niestabilności zadanych wartości nastaw skoku śruby. Do zawodnienia oleju roboczego

w układzie dochodzi najczęściej przez rozszczelnienie płata śruby w piaście, rzadziej przez nieszczelność chłodnicy oleju. Do zapowietrzenia układu natomiast dochodzi z powodu zbyt niskiego poziomu oleju w zbiorniku olejowym, co ma miejsce podczas obsługi okresowych, takich jak czyszczenie filtrów, a także podczas powstania eksploatacyjnych uszkodzeń np. elastycznych przewodów oleju siłowego łączących układ pompowy z blokiem rozrządu, rzadziej podczas napełniania olejem układu po głównej obsłudze podczas postoju statku na doku. Pracująca w układzie mieszanina olejowo-wodna wskutek niejednorodności, oraz innych niż czysty olej własności hydraulicznych, w połączeniu z jego zapowietrzeniem, może powodować skokową pracę układu, a więc może doprowadzić do krytycznych obciążeń mechanicznych śruby nastawnej, jak również zmian termosprężystych elementów tej śruby, w wyniku nieutrzymania właściwej temperatury roboczej oleju. Ponadto powoduje też korozję metalowych elementów układów roboczych.

Wszystkie powyżej wyszczególnione czynniki, wpływające na pracę zespołu napędowego ze śrubą nastawną, stanowią zewnętrzne obciążenia układu. Są to jedne z najważniejszych, obciążeń, które w istotny sposób wpływają na pracę śruby, zużycie jej struktury technicznej i przydatność do dalszej eksploatacji.

Obciążenia wewnętrzne wywołują zmianę zużycia struktury współpracujących elementów składowych układu w następstwie wzajemnego działania ciśnień, termicznego oraz fizyko-chemicznego oddziaływania czynnika roboczego.

Degradacja struktury wewnętrznej śruby jest efektem pracy wysokociśnieniowego hydraulicznego układu oleju roboczego, w którym powstają odkształcenia termosprężyste, które pojawiają się wskutek wysokich ciśnień oleju roboczego istniejących podczas działania na poszczególne elementy. Na wspomnianą degradację wpływa także zużycie tarciove skojarzonych powierzchni współpracujących, oraz chemicznego rozkładu oleju roboczego i ewentualnej penetracji wody zaburtowej w oleju. Bardzo niekorzystne jest zużycie tribologiczne, tarciove poszczególnych elementów śruby nastawnej.

Elementy współpracujące w hydraulicznym układzie wykonawczym, w stanach skrajnych, pracują często na granicy smarowania mieszanego, powodując tym samym, szybsze niż normalne, zużycie współpracujących części, między innymi zużycie łożysk ślizgowych, suwaków sterujących czy tłoka siłownika w cylindrze wykonawczym mechanizmu zmiany skoku śruby nastawnej.

Także szkodliwe są odkształcenia termosprężyste jako skutek ciśnienia oleju roboczego, występujące podczas pracy śruby. Występujące w układzie wysokie ciśnienia oleju roboczego powodują miejscowe odkształcenia termosprężyste powierzchni poszczególnych jego części składowych, jak np. w promieniowym uszczelnieniu ślizgowym. W rozwiązaniu z tłokiem roboczym mechanizmu zmiany skoku, umiejscowionym w wale pośrednim, ulega odkształceniu drąg nastawczy skoku śruby. Takie odkształcenia sprzyjają zmianom struktury powierzchni, miejscowym odkształceniom, co skutkuje utratą szczelności, miejscowym zwiększeniem nacisków, a w konsekwencji wpływa na degradację techniczną układu.

Na zużycie śruby nastawnej i w rezultacie jej uszkodzenie wpływa także mechanika przepływu oleju w przestrzeniach hydraulicznych (układzie hydraulicznym). Mechanika przepływu oleju w układzie roboczym przez szczeliny w suwakach powoduje ich zużycie

kawitacyjne, natomiast na kryzach objawia się zjawiskiem obliteracji, czyli miejscowego zarastania przejścia wytrącającymi się składnikami oleju roboczego. Choć te ostatnie zdarzenie jest zjawiskiem chwilowym, to skutki kawitacji pozostają trwałe. Są to działania o wysokiej dynamice, wpływające na opory przepływu oraz na czas przesterowania, jak i w efekcie sprawność układu wykonawczego.

Niezwykle istotnym dla poprawnego działania śruby nastawnej jest stan oleju roboczego, jego właściwości fizyko – chemiczne. Na wewnętrzne obciążenia układu ma znaczący wpływ czystość, temperatura oraz stopień zawodnienia oleju roboczego. Nieodpowiedni stan oleju powoduje wzrost zużycia elementów układów w porównaniu do normalnych warunków pracy. Zanieczyszczenia stałe (drobiny metalu) powstają jako skutek mechaniki pracy, a powiększenie ich zawartości w oleju roboczym jest rezultatem niewłaściwej obsługi i czasu jej wykonania (filtracja). Wzrost temperatury pracy oleju roboczego ponad dopuszczalną, określoną przez producenta, przyczynia się do jego skoksowania i wzrostu temperatury pracy zespołu, degradacji chemicznej oleju, co, w połączeniu z zawodnieniem, powoduje agresywne oddziaływanie chemiczne na elementy układu. Takie obciążenia wywołują zmiany oleju roboczego, przez co zmienia się jego struktura, staje się on cieczą niejednorodną o innych, niż oczekiwane, własnościach hydrodynamicznych cieczy roboczej.

Poprawne działanie śrub nastawnych uniemożliwiają niesprawności i uszkodzenia reduktorów powietrza w układzie pneumatycznego sterowania, elementów elektroniki w układach elektrycznego / elektronicznego sterowania.

Obciążenia wewnętrzne śruby o skoku nastawnym są powodowane niesprawnościami będącymi rezultatem naruszenia spójności struktury wewnętrznej układu sterowania. Jeśli jest to układ pneumatyczny, to istotnego znaczenia nabiera stan zdatności elementów pneumatyki takich, jak reduktory, zawory potwierdzenia miejsca sterowania, zawory redukcyjno-przebieżnikowe typu Westinghouse'a. Są one bowiem najczęściej użytkowane, a z praktyki eksploatacyjnej i remontów wykonywanych na statkach wiadomo, iż powietrze sterujące nie jest w wystarczający sposób obrobione i przygotowane do pracy. Pobierane jest ono przez układ sterowania z częstym pominięciem bloku osuszania i naolejania. Reduktory poprzez wadliwą pracę nie utrzymują zadanych wartości ciśnień, co objawia się pulsacyjną ich zmianą w układzie. Niesprawność zaworu Westinghouse'a z kolei zmienia fabryczne nastawy ciśnień powietrza sterującego, odpowiadającym nastawom skoku śruby. Zupełnie innym rodzajem w skutkach jest niesprawność zaworu potwierdzenia miejsca sterowania albowiem pojawia się samoczynne przestawienie zaworu, a taki stan, przy niezgodności nastaw telegrafów maszynowy – mostkowy, powoduje olbrzymie zagrożenia dla zespołu napędowego statku. Przyjąć więc należy, że jakość powietrza sterującego, (stan jego wilgotności i czystości), również są czynnikiem działania wewnętrznego, powodując podwyższoną degradację elementów automatyki pneumatycznej, obrazującą się obniżoną sprawnością jej elementów. Natomiast w przypadku układów elektrycznego czy elektronicznego sterowania zespołem śruby nastawnej ma duży wpływ środowisko jego eksploatacji, tzn. mocno wilgotne środowisko otoczenia, zmienność jego temperatur, oraz drgania. Warunki te sprzyjają wykraplaniu się pary wodnej, przegrzaniu elementów układów elektronicznych, a drgania sprzyjają luzowaniu zacisków połączeń końcówek przewodów elektrycznych. Ten rodzaj niesprawności układu objawia się w sposób nagły, bez oznak wcześniejszego zaistnienia, co jest szczególnie niebezpieczne podczas przejść przez kanały, czy podczas manewrowania statku w porcie.

Obciążenia zewnętrzne oraz wewnętrzne wpływające na funkcjonowanie śruby nastawnej zależą od zmian jej stanu technicznego, który zależy od działań i własności czynników fizyko-chemicznych. Stan techniczny określony jest przez warunki parametrów struktury konstrukcji, która ulega ciągłej degradacji w procesie użytkowania i niekiedy obsługiwania. Z powyższego wynika, że transformacji energii wejściowej, którą wyraża moment wejściowy

(na sprzęgle) M_W , której objawem jest moment obrotowy na stożku śruby M_s układu napędowego, towarzyszą liczne i złożone procesy fizyko-chemiczne uwarunkowane jak i nieuwarunkowane działaniem śruby. Procesy te zachodzą w czasie użytkowania i obsługi, wymuszając zużycia takie, jak tarciove, korozyjne, erozyjne, kawitacyjne mikrosprężyste odkształcenia warstw wierzchnich elementów układów tribologicznych, itp. Są to procesy wejściowe układu napędowego śruby nastawnej, które można opisać mierzalnymi wielkościami, nazywanymi parametrami wejściowymi. Służą one za podstawę do zbudowania modelu matematycznego śruby o skoku nastawnym, a co za tym idzie mogą służyć do zbudowania modelu diagnostycznego takiego zespołu urządzeń, jakim jest śruba nastawna.

4.4 Uszkodzenia śrub nastawnych i ich skutki

Bezpieczeństwo statku wymaga działań polegających na kształtowaniu a następnie takim utrzymaniu niezawodności zespołu napędowego bądź dowolnego jego urządzenia, np. śruby o skoku nastawnym, aby uzyskać akceptowalne ryzyko powstania wypadku morskiego. Działania te wymagają rozeznania w zakresie możliwych rodzajów uszkodzeń, istotnych dla bezpieczeństwa, także ich przyczyn i objawów, oraz zakresu działań zapewniających pełną odnowę uszkodzonego urządzenia. Ważne więc jest to rozeznanie, aby powstała wiedza, która jest niezbędna do podejmowania działań, które umożliwiłyby zapobieganie tym uszkodzeniom. Do uszkodzeń, istotnie wpływających na bezpieczeństwo statku, niewątpliwie należą niektóre uszkodzenia śruby o skoku nastawnym, to znaczy takich śrub napędowych, które umożliwiają dowolną płynną zmianę prędkości statku przy stałej lub zmiennej prędkości obrotowej silnika napędu głównego, przez zmianę jej skoku, uzyskiwaną wskutek zmiany położenia skrzydeł śruby względem piasty. Spośród tego rodzaju uszkodzeń można przykładowo wymienić takie jak:

- urwanie skrzydła śruby,
- zgięcie skrzydła śruby,
- krytyczne pęknięcie skrzydła śruby,
- zwarcie w izolacji silnika elektrycznego nadajnika śruby nastawnej,
- pęknięcie sprężyny zaworu przelewowego,
- pęknięcie przewodów powietrza sterującego powodujące zanik sprężonego powietrza w układzie sterowania śrubą nastawną (przy sterowaniu pneumatycznym),
- krytyczne rozszczelnienie piasty śruby,
- zacięcie/zatarcie suwaka rozdzielacza skrzyni rozrządu oleju,
- uszkodzenie przekątnikowego zaworu Westinghouse'a (przy sterowaniu pneumatycznym),
- pęknięcie przewodu wysoko ciśnieniowego oleju roboczego,
- uszkodzenie zaworu wyboru miejsca sterowania.

Wszystkie wyżej wymienione uszkodzenia śrub nastawnych, zaistniałe podczas użytkowania (aktywnej eksploatacji) statków, powodują wzrost kosztów eksploatacyjnych oraz postępowanie administracyjne, tzn. rozpatrywane są przez odpowiednie dla miejsca zdarzenia i bandery statku Izby Morskie. Wtedy są wydawane orzeczenia w danej sprawie, zawierające m.in. takie informacje jak:

- rodzaje stwierdzonych uszkodzeń poszczególnych elementów układów śruby nastawnej,
- przyczyny tych uszkodzeń;
- objawy wywołane przez te uszkodzenia, zaobserwowane przez załogę;
- działanie załogi po stwierdzeniu zaistnienia każdego ze wspomnianych uszkodzeń, oraz zalecenia dla armatora i/lub odpowiedzialnych za zdarzenie członkom załogi.

Uniknięcie takich uszkodzeń w procesie użytkowania aktywnego jest możliwe jeżeli będą przestrzegane zasady racjonalnego użytkowania śrub nastawnych z uwzględnieniem

ich aktualnej struktury konstrukcyjnej, czyli ich stanu zdatności, niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania oraz diagnostyki technicznej, odpowiedniej dla danego zespołu technicznego.

Cechą wspólną wyżej wymienionych uszkodzeń jest to, że są one zdarzeniami losowymi, a więc takimi zdarzeniami, których zajścia nie można dokładnie przewidzieć. Możliwym jest jednak określenie prawdopodobieństwa ich pojawiania się, jeśli będą prowadzone badania empiryczne (w tym statystyczne) tych uszkodzeń i innych zdarzeń, które je wymuszają.

Trafność przewidywania każdego ze wspomnianych uszkodzeń i podjęcie w wyniku jego zaistnienia decyzji zależy od wiedzy użytkownika śruby na temat przyczyn ich powstawania oraz zakresu działań, jakie powinny być podjęte w przypadku zaistnienia poszczególnych uszkodzeń.

W praktyce eksploatacyjnej wspomniane uszkodzenia na ogół nie występują pojedynczo, lecz jednocześnie, tworząc zbiór uszkodzeń fizycznie powiązanych, jako związek przyczynowo skutkowy i z tego powodu zauważonych niemalże w tym samym przedziale czasu. Taki zbiór może przykładowo składać się z następujących uszkodzeń:

- zgięcie skrzydła śruby i związane z nim na ogół pęknięcie śrub mocujących skrzydło,
- nadmierne zużycie tłoka siłownika oraz zużycie cylindra siłownika mechanizmu zmiany skoku śruby, powodujące nadmierny luz między tłokiem a cylindrem tego mechanizmu,
- ścięcie śrub mocujących skrzydło do piasty śruby,
- pęknięcie/urwanie płata śruby i związane z tym wzrost zużycia łożysk w zespole śruby nastawnej wskutek pojawienia się drgań w wyniku utraty wyważenia śruby,
- krytyczne rozszczelnienie piasty śruby nastawnej i wynikający z tego znaczny wpływ oleju z układu roboczego/siłowego, doprowadzające do utraty sterowania śrubą oraz zanieczyszczenie środowiska naturalnego,
- uszkodzenie pętli sprzężenia zwrotnego i związana z tym oscylacyjna zmiana pozycji płatów śruby wokół pozycji zadanej, co wpływa na znaczne zużycie części wykonawczego układu siłowego i ciągłą zmianę nastaw dawki paliwa na silniku głównym,
- uszkodzenie powodujące nagłą utratę ciśnienia oleju siłowego/wykonawczego, co pociąga za sobą zablokowanie śruby w pozycji aktualnie nastawionej,
- uszkodzenie, którego wynikiem jest krytyczna, nagła utrata ciśnienia powietrza sterującego (niektóre układy ze sterowaniem pneumatycznym) co związane jest z samoistnym, natychmiastowym przesterowaniem pozycji płatów śruby nastawnej w pozycję max CN (np. Nova Lips - model HCP-184).

Z tego też powodu, takie zbiory uszkodzeń zostaną dalej przedstawione, łącznie z ich objawami, przyczynami i działaniami niezbędnymi do ich usunięcia i tym samym odnowy stanu technicznego śruby, w których one wystąpiły.

W przypadku zatarcia tłoka w tulei siłownika mechanizmu zmiany skoku (*MZSS*) związanego z nim niekiedy pęknięcia tulei cylindrowej, przyczyny mogą być następujące:

- nieodpowiednie własności fizykochemiczne oleju,
- urwanie śruby mocującej płat do piasty, a tym samym częściowe lub krytyczne rozszczelnienie piasty (penetracja wody zaburtowej do oleju),
- przegrzanie oleju roboczego,
- niewłaściwie wyregulowana praca toru sprzężenia zwrotnego w systemie sterowania śrubą,
- znacznie dłuższy od oczekiwanego czas poprawnej pracy siłownika *MZSS*.

Zajście wspomnianych uszkodzeń powoduje powstanie następujących objawów, które załoga może łatwo zaobserwować:

- wolniejsze przesterowanie skrzydeł śruby,
- niewłaściwe wartości wielkości charakteryzujących własności fizykochemiczne oleju,

- mało stabilna pozycja wartości zadanej skoku śruby, (pulsacyjna praca układu sterowania wokół pozycji zadanej skoku),
- wzrost zanieczyszczeń odkładających się na filtrze dokładnego oczyszczania i magnetycznego.

W przypadku uszkodzenia w formie ścięcia śrub mocujących skrzydło do piasty śruby, przyczyny mogą być następujące:

- niewłaściwe dokręcenie śrub w czasie montażu,
- nieodpowiednie zabezpieczenie śrub przed odkręceniem ich nakrętek,
- wykonanie niezgodnych z wymaganiami podkładek zabezpieczających (np. wykonanie otworów o nadmiernej średnicy), które uniemożliwiają uzyskanie równomiernego napięcia wstępnego tych śrub,
- wykonanie śrub niezgodnie z wymogami klasy wytrzymałości oraz procesu ich wytworzenia np. zamiast metodą odkuwania wykonanie z zastosowaniem obróbki skrawaniem i związane z tym pojawienie się zjawiska karbu, oraz zmiana struktury w materiale śruby.

Zajście wspomnianego uszkodzenia może spowodować następujące objawy, które mogą być zaobserwowane przez załogę statku.

- pojawienie się drgań przy biegu śruby z nastawą „Stop” (bez obciążenia),
- miejscowe rozszczelnienie zamocowania płata śruby do piasty i w konsekwencji penetracja wody zaburtowej do oleju co spowoduje zmianę barwy oleju, jego gęstości i temperatury pracy.

W przypadku uszkodzenia przełącznikowego zaworu redukcyjnego Wetinghouse'a przyczyny mogą być następujące:

- zbyt długi okres pracy bez wykonanego przeglądu konserwacyjno – remontowego,
- niewłaściwa jakość powietrza sterującego (zawodnienie, brak naolejenia),
- zużycie / uszkodzenie elementów gumowych uszczelnień rozdzielaczy i reduktora,
- uszkodzenie układu przekazania pozycji dźwigni sterującej na suwak reduktora,
- niewłaściwa regulacja ciśnienia na stacji reduktorów powietrza sterującego.

Zaistnienie takiego stanu uszkodzenia może spowodować następujące objawy, które mogą być rozpoznane przez załogę:

- zmiana wartości nastaw ciśnień powietrza sterującego, przypisanych, zaprojektowanych dla odpowiadających pozycji skoku śruby,
- ciągły odgłos uchodzącego powietrza z tego zaworu podczas jego pracy, (normalnym stanem jego pracy jest pojawiający się wspomniany odgłos tylko w chwili zmiany nastawy),
- może pojawiać się samoistna zmiana nastawy skoku, do chwili uzupełnienia w linii sterującej wymaganego ciśnienia powietrza, a więc niestabilna nastawa skoku śruby,
- w skrajnym przypadku niemożność zadania zmian skoku śruby, pomimo zmiany pozycji dźwigni zadającej, a więc wyłączenie urządzenia z poprawnej pracy,

W przypadku uszkodzenia polegającego na nagłej utracie ciśnienia i/lub oleju roboczego w układzie śruby nastawnej może być spowodowane przez:

- krytyczne rozszczelnienie połączenia płata śruby do piasty, np. utratą tego płata,
- uszkodzenie rur teleskopowych doprowadzających olej do siłownika zmiany skoku,
- uszkodzenie przewodów elastycznych doprowadzających olej do zespołu rozrządu oleju,
- wyłączenie z pracy pomp obsługujących zespół śruby nastawnej.

Zajście takiego uszkodzenia może spowodować następujące objawy, które mogą być rozpoznane przez załogę:

- pojawienie się krytycznych drgań śruby, po czym nastąpi utrata oleju w obiegu smarowania piasty (odpowiednie zbiorniki i sygnalizacja poziomu),

- brak możliwości wykonania zmiany skoku śruby, przy poprawnie działającym zadajniku skoku i zespołu rozrzędu oleju, brak aktywacji alarmu odpowiednich obiegów olejowych i pozostałych układów obsługowych śruby,
- bardzo szybka utrata oleju z aktywacją alarmu niskiego poziomu oleju w zbiorniku / obiegu, zablokowanie ostatniej zdanej nastawy skoku, obfity wyciek oleju do siłowni,
- alarm niesprawności pomp olejowych (łącznie z brakiem przełączeń), utrzymanie ostatniej pozycji zadanego skoku śruby, wskutek zadziałania zaworu zwrotnego, brak ubytków oleju.

Uszkodzenie polegające na niepoprawnym działaniu instalacji elektrycznej układu sterowania skokiem śruby może być spowodowane przez:

- przeciążenia układów elektrycznych,
- zalanie wodą,
- przegrzanie układów elektroniki obsługującej sterowanie i pracę śruby.

Zajście takiego stanu może spowodować objawy, które mogą być rozpoznane przez załogę:

- uaktywnienie alarmów obwodów elektronicznych / elektrycznych,
- zależnie od konfiguracji układu elektronicznego / elektrycznego utrzymanie ostatniej nastawy skoku lub przesterowanie skoku śruby do pozycji Stop,
- wyraźny wzrost temperatury elementów układu elektronicznego / elektrycznego jeszcze przy poprawnie pracującym układzie sterowania, ale z możliwym alarmem wzrostu temperatury tego układu.

Usunięcie poszczególnego uszkodzenia, zależnie od jego rodzaju, wymagać będzie innych działań, w jednym przypadku będą to działania materiałowe, w innym techniczne. Tak więc działania te polegać będą na:

- sprawdzeniu i uzupełnieniu zapasów magazynowych części i materiałów,
- sporządzeniu raportu z rodzaju i zakresu uszkodzenia, powiadomieniu producenta urządzenia, lub autoryzowanego serwisu,
- przygotowaniu śruby i jej mechanizmu do naprawy głównej,
- przeprowadzenia prób działania śruby po naprawie w obecności przedstawiciela klasyfikatora statku,
- sporządzeniu raportu z zakresu wykonanych czynności i wprowadzenie danych do systemu nadzoru stałego (*PMS, CMS*).

Każde z opisanych wyżej uszkodzeń śruby nastawnej, jak również spowodowana przez nie każda z wymienionych sytuacji może zajść z określonym, mniejszym bądź większym, prawdopodobieństwem. Prawdopodobieństwo to zawsze będzie mniejsze w przypadku konsekwentnego przestrzegania zasad racjonalnego użytkowania tych śrub.

Właściwości śrub nastawnych zmieniają się pod wpływem samorzutnie zachodzących procesów oraz zewnętrznych oddziaływań. Część zmian charakteryzuje się nieodwracalnością zaistniałego stanu. Procesy te mogą doprowadzić do zniszczenia elementów śruby nastawnej, a w konsekwencji wyłączenia śruby z eksploatacji lub jej utraty całkowitej. Każda awaria śruby jest rozległym naruszeniem spójności jej struktury konstrukcyjnej. Jak wcześniej wspomniano, jest to zdarzenie losowe, powodujące, że śruba nastawna, czasowo lub trwale traci swój stan zdatności (s_1), wskutek czego na pewno przechodzi do stanu częściowej zdatności (s_2) lub nawet niezdatności (s_3), przy czym zmiana stanów tej śruby może zaistnieć jako osiągnięcie stanu zdatności częściowej, czyli przejście ze stanu (s_1) do (s_2), lub jako ciąg po sobie następujących stanów z przejściem ze stanu (s_2) do stanu (s_3). W procesie użytkowania aktywnego podczas pracy może zaistnieć również taka sytuacja, która cechuje się nagłym wyłączeniem śruby z eksploatacji. Ponieważ nie każdy stan ze zbioru stanów $S = \{s_i; i=1,2,3,4\}$ eliminuje śrubę z użytkowania, należy zaistniałe uszkodzenie rozpatrywać w oparciu o takie modele, które w sobie zawierają stany pośrednie.

Ponieważ podczas procesu projektowania i wytwarzania przyjmuje się wartości parametrów (śruby, jej podzespołu, elementu) jako graniczne dopuszczalne podczas procesu użytkowania aktywnego, wypływa stąd wniosek, że przekroczenia tych wartości granicznych w procesie niewłaściwego użytkowania aktywnego, lub oddziaływania niezależnego od użytkownika, doprowadza do awarii, a więc rozległego naruszenia spójności struktury konstrukcyjnej, co może i doprowadza do znacznych strat technicznych, ekonomicznych i zagraża środowisku naturalnemu.

W celu identyfikacji uszkodzeń śruby nastawnej od stanu pełnej zdatności (s_1) poprzez stan zdatności częściowej (s_2) do stanu niezdatności (s_3) należy dokonać podziału uszkodzeń. Śruba pracując w środowisku wodnym, podlega działaniu tego środowiska. Zachodzą tam złożone procesy hydrodynamiczne w bezpośredniej bliskości płatów śruby, oraz fizyczne bezpośrednio na nich. Z obracających się w wodzie płatów śruby spływają wiry (z każdego z osobna), które tworzą wstęgi wirowe zbiegające się za śrubą, w silne wiry wierzchołkowe. W wirach tych, w wyniku działania sił odśrodkowych, ciśnienie znacznie spada, co powoduje wydzielanie się rozproszonego w wodzie powietrza i pary wodnej. Zjawisko to jest widoczne jako rurkowe spiralne ślady pozostające po pracującej śrubie co pokazano na rys. 4.8. Jest to kawitacja laminarna, z małym negatywnym oddziaływaniem na śrubę. Jednak w miarę wzrostu prędkości obrotowej śruby, zmiany jej skoku, oraz zależnie od profilu jej płatów, wzrasta dynamika tego zjawiska, rozszerza się ona na dalsze części płatów śruby, pokrywając swoim działaniem coraz większą jej powierzchnię [52, 105].



*Rys. nr. 4.8
Wstęgi wirowe strugi wody spływającej
z płatów śruby podczas jej pracy [105].*

Do rozwoju kawitacji przyczyniają się znacznie nierówności na płatach śruby, a w szczególności nierówności na krawędziach spływu. Ten rodzaj kawitacji nazywany jest kawitacją pęcherzykową, gdyż para wodna i powietrze wydzielają się w postaci pęcherzyków przemieszczających się wzdłuż skrzydła. Ten rodzaj kawitacji, z powodu obniżenia ciśnienia poniżej ciśnienia pary nasyconej w miejscu wydzielania się pęcherzyków na powierzchni płatów, powoduje powierzchniowe ubytki materiału w płatach śruby. Zjawisko to jest wprawdzie powolne, lecz ciągłe w czasie, narusza strukturę materiału śruby, tym samym obniża jej stan techniczny. Ten rodzaj uszkodzenia (nadmierne zużycie śruby) możemy zaliczyć do uszkodzeń narastających stopniowo. Następuje on powoli, przyczyniając się do przejścia ze zdatności pełnej śruby (s_1) do zdatności częściowej (s_2). W takim stanie w dalszym ciągu zachowana jest zdolność śruby do wykonania zadania, ale z obniżoną sprawnością, zależnie od stopnia rozległości tego uszkodzenia. Rodzaj ten i zakres uszkodzenia nie eliminuje śruby z wykonywania przez nią zadania, pod warunkiem nieprzejścia do stanu niezdatności (s_3), czyli krytycznego ubytku materiału płatów śruby, co skutkować będzie jego ułamaniem, a w rezultacie jego utratą.

Podobnym rodzajem uszkodzenia częściowego, stopniowego, jest rozszczelnienie powodujące penetrację wody do obiegu olejowego. Mamy tutaj przypadek korozyjnego działania wody na elementy sterujące, jak również zmianę struktury fizyko-chemicznej oleju. Następuje tu korozyjne zużycie powierzchni roboczych elementów hydrauliki oraz wypłukanie dodatków uszlachetniających z oleju roboczego, co zostało pokazane na rys.4.9.



Rys. nr.4.9
Korozyjne i mechaniczne uszkodzenie przylgni zaworu zwrotnego. [zdjęcie własne].

Wprawdzie pojawia się wtedy niestabilność w utrzymaniu zadanej pozycji śruby, ale jednak przy odpowiednim postępowaniu można dalej eksploatować śrubę ale jednak z pewnymi ograniczeniami czasu jej eksploatacji, tzn. do najbliższej możliwej naprawy, alternatywnie ponosząc wzrastające koszty eksploatacyjne z systematycznym obniżeniem jakości sterowania i pracą śruby.

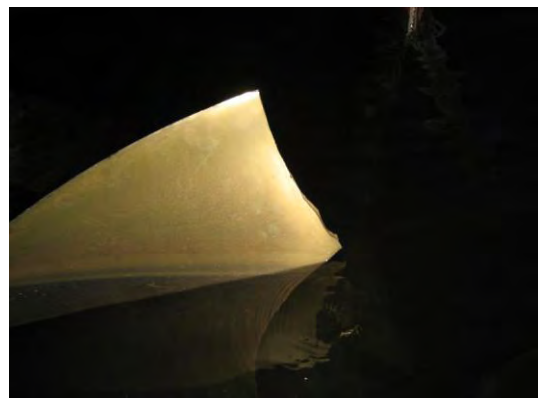
Innym przypadkiem uszkodzenia częściowego jest pęknięcie płata śruby. Wprawdzie możliwe jest w dalszym ciągu wykonanie zadanie przez śrubę, jednak z bardzo wyraźnymi ograniczeniami.



Rys.4.10
Pęknięcie płata śruby [zdjęcie własne].

Z uwagi na głębokie naruszenie struktury konstrukcyjnej płata śruby pojawiają się drgania, wpływające na pracę całego obiektu technicznego, jakim jest zespół napędu ze śrubą nastawną. Taka sytuacja przyczynia się nie tylko do przejścia układu ze stanu zdatności pełnej (s_1) do stanu zdatności częściowej (s_2), gdy w przypadku samego płata śruby powoduje nagłe przejście ze stanu zdatności pełnej (s_1) do stanu niezdatności (s_3), ale jeszcze z możliwością wykonania zadania z konkretnymi ograniczeniami. W tym przypadku mówimy o uszkodzeniach nagłych.

W eksploatacji śrub nastawnych zdarzają się uszkodzenia nagłe, krytyczne, do których zaliczyć możemy połamanie / urwanie płata śruby, uszkodzenie układu rurowego doprowadzającego olej do MZSS, krytyczne zatarcie, zablokowanie tłoka MZSS w piaście śruby.



Rys. nr.4.11
Utrata kawałka płata śruba skutkiem uderzenia o twarde ciała obce pływające w polu pracy śruby [zdjęcie własne].

Powyższe uszkodzenia oprócz poważnego naruszenia spójności konstrukcyjnej i pogorszenia własności struktury materiałowej, całkowicie eliminują śrubę z eksploatacji, co uniemożliwia wykonanie zadania przez śrubę.



Rys. nr.4.12

Widoczne uszkodzenie rurowego wału śrubowego w miejscu jego łożyskowania (1) oraz ślady korozji wału w wyniku penetracji wody morskiej do pochwy (2) [zdjęcie własne].

Jak wynika z powyższego, w przypadku jednych uszkodzeń potrzebne będą stosunkowo niewielkie nakłady pracy i odpowiednie materiały, aby układ ze stanu sprawności częściowej (s_2) został odnowiony do stanu zdatności całkowitej (s_1) (np. odtworzenie kształtu płata śruby przez uzupełnienie ubytków kawitacyjnych, wymiana elementów uszkodzonych w zaworze redukcyjnym Westinghouse'a, zapolerowanie ubytków korozyjnych, części wału lub elementów układu sterowania hydraulicznego zależnie od stopnia ich zużycia). Inne rodzaje uszkodzenia wymagać będą znacznego czasu i kosztów do usunięcia ich skutków, które polegać będą na holowaniu statku, wyłączeniu go z eksploatacji, dokowanie, wykonanie nowych elementów (np. wykonanie i montaż nowego płata śruby w miejsce utraconego, demontaż *MZSS* w celu naprawy/wymiany zatartego/pękniętego tłoka tego mechanizmu, polerowanie miejsca osadzenia wału w łożyskach, wykonanie i montaż nowego układu rurowego doprowadzającego olej do *MZSS*).

W świetle powyższego, przyjmując za kryterium klasyfikacji możliwość przywrócenia stanu zdatności pełnej (s_1) uszkodzonej śrubie, możemy dokonać podziału [44]:

- uszkodzenia usuwalne (zwane także czasowymi lub chwilowymi),
- uszkodzenia nieusuwalne (zwane stałymi).

W pierwszym przypadku są to uszkodzenia powodujące przejścia ze stanu zdatności pełnej (s_1) do stanu zdatności częściowej (s_2), ale bez przejścia do stanu niezdatności częściowej (s_3) lub niezdatności całkowitej (s_4). Drugi przypadek dotyczy uszkodzeń, w wyniku których śruba przechodzi do stanu niezdatności częściowej (s_3), ale z poważnymi ograniczeniami wykonania zadania, oraz do stanu niezdatności całkowitej śruby (s_4). Takie stany zachodzą w wyniku przekroczenia wartości krytycznych zakładanych przez projektanta i założeń eksploatacyjnych mechanizmu, a więc mamy tu uszkodzenia:

- krytyczne (uniemożliwiają dalsze wykonanie zadania przez śrubę),
- ważne (wymagane jest niezwłoczne podjęcie działań związane z przywróceniem wymaganego / możliwego stanu zdatności śruby).

Jeżeli uszkodzenie nie wymaga natychmiastowej interwencji, czyli nie narusza możliwości wykonania zadania przez śrubę lub uszkodzenie które nie ma wpływu na działanie śruby, może być uznane za uszkodzenie:

- mało ważne,
- nieistotne.

Należy również zauważyć, że opisywane uszkodzenia następują w konsekwencji zaistniałych sytuacji, wynikających z oddziaływania środowiska, użytkownika lub

wzajemnego oddziaływania elementów tego obiektu na inne elementy składowe śruby nastawnej. Mogą przy tym powstać uszkodzenia częściowe lub całkowite, którym towarzyszy utrata zdolności do działania. Wymaga to wprowadzenia pojęcia uszkodzeń:

- całkowitych i częściowych,
- zależnych i niezależnych.

Taki podział ma istotny wpływ na tworzenie specyfikacji remontowych, jak również określenie zakresu prac i zapotrzebowania materiałowego, oraz, co jest najistotniejsze w eksploatacji statku, wymaga uzyskania odpowiednich dokumentów zezwalających na bezpieczne uprawianie żeglugi.

Opisane zdarzenia miały miejsce na statkach uprawiających żeglugę oceaniczną, promową i przybrzeżną. Spowodowały one zagrożenia dla statku i obiektów portowych, skutkowały utratą manewrowości statku i jego napędu. Doprowadziły do powstania nowych, wcześniej nieprzewidzianych sytuacji eksploatacyjnych, uszkodzeń innych elementów układu napędowego wskutek wzrostu drgań (utrata płyta śruby lub jego części). Oczywistym staje się, że spowodowały one zagrożenia dla życia załogi, statku jak i środowiska naturalnego.

W zaistniałych sytuacjach, przy podejmowaniu decyzji, istotnym staje się stan emocjonalny członków załogi, czas, jakim załoga dysponowała, oraz wiedza i kompetencje oficerów.

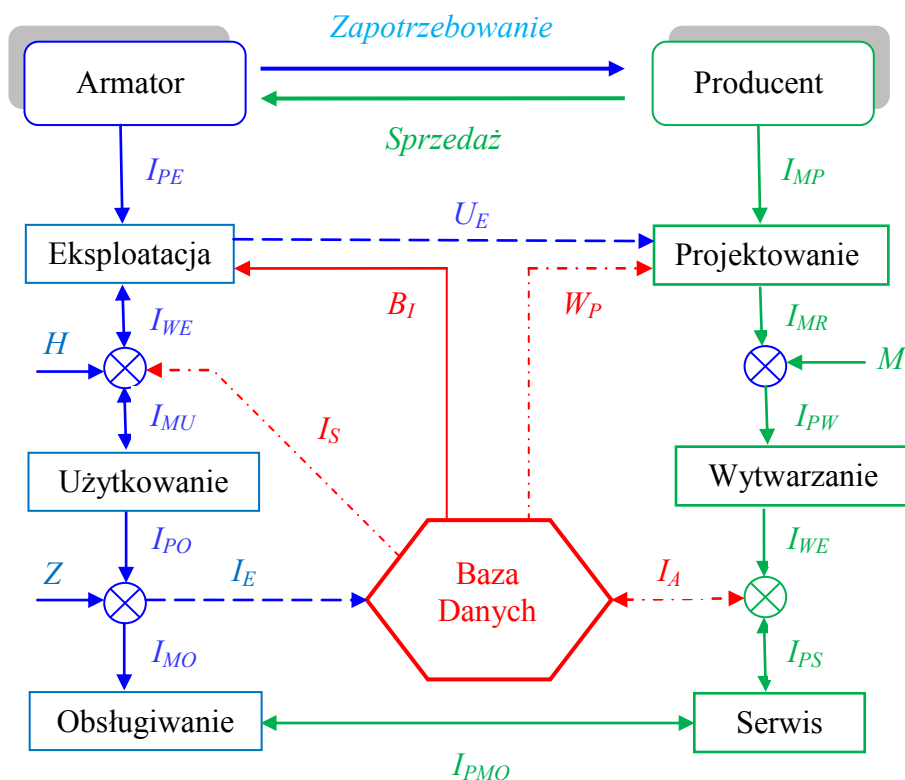
W celu wykazania istotnego wpływu uszkodzeń śruby nastawnej na bezpieczeństwo ruchowe statku, w załącznikach opisano wybrane uszkodzenia, reprezentujące poszczególne podzespoły ruchowe śruby nastawnej, jak również wskazano na sposoby usunięcia tych niesprawności w celu przywrócenia możliwej do osiągnięcia, w danych warunkach eksploatacyjnych, sprawności (zdatności) zespołu śruby nastawnej.

Jak z powyższego opisu uszkodzeń i ich przyczyn oraz skutków wynika, że stosowane dotąd systemy diagnozujące (*SDG*) śruby nastawnej są dalece nieprzystosowane i niewystarczające do podejmowania odpowiednich decyzji, które mogłyby zapobiec powstaniu przynajmniej niektórych z opisanych uszkodzeń. Koniecznym zatem staje się opracowanie takich systemów *SGD*, które zawierałyby w sobie wieloaspektowość zachodzących procesów i uchroniłyby załogę (użytkownika) od uszkodzeń śrub nastawnych, stwarzając tym samym możliwość zapobiegania im. Wymaga to jednak opracowania odpowiedniego modelu diagnostycznego śrub nastawnych.

4.5 Możliwości zapobiegania uszkodzeniom śrub nastawnych

Możliwości techniczne związane z ruchem statku, jakie stwarza zastosowanie śrub o skoku nastawnym do ich napędów, są wymierne, i przynoszą konkretne korzyści zarówno eksploatacyjne jak i ekonomiczne. Warunkiem osiągnięcia maksymalnie wysokiej efektywności napędowej statku jest utrzymanie zespołu śruby nastawnej w bardzo wysokiej sprawności technicznej i trwałości jej elementów, co przekłada się bezpośrednio również na bezpieczeństwo uprawianej żeglugi.

Aby osiągnąć ten cel, producenci śrub nastawnych wciąż gromadzą dane z zaistniałych awarii, doświadczenia związane z powstawaniem różnych stanów eksploatacyjnych. Analizując te dane, wprowadzają oni ulepszenia w strukturze konstrukcyjnej śrub nastawnych, zwiększając tym samym ich niezawodność. Działanie takie byłoby znacznie efektywniejsze, gdyby przepływ informacji, dotyczących eksploatacji i nowych rozwiązań konstrukcyjnych *SN* pomiędzy armatorem a producentem, zawierał w sobie informacje z bazy danych utworzonej ze wszystkich eksploatowanych śrub nastawnych tego samego producenta, będących aktualnie w użytkowaniu. Przykładowy obieg informacji, proponowany przez autora, przedstawia rys. 4.13.



Rys. 4.13 Przykładowy diagram obiegu informacji eksploatacyjnych i serwisowych SN:

H – ograniczenia eksploatacyjne, Z – ograniczenia wynikające z kwalifikacji załogi, M – nowe materiały stosowane do produkcji SN, U_E – uwagi eksploatacyjne, I_S – informacje serwisowe, I_E – informacje eksploatacyjne, I_A – informacje wynikające z analizy wykonanego serwisu, B_I – Biuletyny informacyjne, I_{PE} – informacje o potrzebach eksploatacyjnych, I_{WE} – informacje o własnościach eksploatacyjnych SN, I_{MU} – informacje o możliwościach użytkowych SN, I_{PO} – informacje o potrzebach obsługowych SN, I_{MO} – informacje o możliwościach obsługowych SN, I_{MPO} – informacje o potrzebach i możliwościach związanych z odnową SN, I_{MP} – informacje o możliwościach produkcyjnych SN, I_{MR} – informacje o możliwościach projektowych SN, I_{PW} – informacje o potrzebach wytwarzania SN, I_{WE} – informacje o własnościach eksploatacyjnych SN, I_{PS} – informacje o potrzebach serwisowych, W_P – wspomaganie projektowania (ulepszenia).

Aktualnie wszystkie informacje, wynikające z analizy zaistniałych awarii, czyli przejścia SN ze stanu pełnej zdadności (s_1) do stanu zdadności częściowej (s_2) lub niezdadności (s_3), stanowią tajemnicę armatora oraz producenta. Na użytkowanie śruby nastawnej, zależnie od wymogów eksploatacyjnych armatora, wpływają ograniczenia eksploatacyjne (H) wynikające z warunków wewnętrznych i zewnętrznych, oraz rzetelność (B_I) serwisowych biuletynów informacyjnych, które mogą i powinny być wsparte (I_S) informacjami serwisowymi (których brak). Dlatego też na jakość użytkowania mają istotny wpływ (Z) kwalifikacje operatora śruby nastawnej, a brak przesyłu (I_E) informacji eksploatacyjnych do producenta (serwisu) sprawia, iż nie można przeprowadzić należytej analizy stanu pracy, a tym samym wspomóc załogi statków w podejmowaniu racjonalnych i trafnych decyzji eksploatacyjnych.

W takiej sytuacji eksploatacja śrub nastawnych odbywa się w oparciu o przekazy wewnętrznie armatorskie oraz własne bazy danych, tworzone bardziej lub mniej profesjonalnie, zależnie od umiejętności interpretacji przez załogę zauważonych zmian dotyczących stanów technicznych SN.

Działania te może wesprzeć tworzenie odpowiednich SD służących do identyfikacji stanu technicznego SN. Istniejące procedury użytkowania i nadzoru, wciąż niewystarczające do

opracowania *SD* dla potrzeb eksploatacyjnych, nie chronią śrub nastawnych przed rozległymi uszkodzeniami, którymi są awarie ich mechanizmów. Taki stan wymusza prowadzenie dalszych badań zarówno w kierunku rozwiązań technicznych jak i doskonalenia systemów diagnozujących tego rodzaju pędników. Powodem takich działań producentów śrub o skoku nastawnym są wielopłaszczyznowe wymuszenia. Z jednej strony coraz większe moce instalowanych silników głównych, a więc i większe obciążenia przenoszone na płyty śruby, z drugiej zaś daleko posunięta komercjalizacja w przemyśle okrętowym i przewozach morskich (manewry bez holowników, dopasowanie pracy zespołu napędowego niemalże do każdego warunków pływania).

Aby skutecznie zapobiegać uszkodzeniom śrub nastawnych, należy zbudować dla nich systemy diagnozujące adekwatne do aktualnych potrzeb eksploatacyjnych. Wymaga to opracowania odpowiedniego modelu diagnostycznego *SN* przysposobionego do realizacji tych potrzeb. Wobec tego konieczną jest analiza zaistniałych uszkodzeń śrub nastawnych, jak i możliwości zapobiegania tym uszkodzeniom. Opisane uszkodzenia miały miejsce w różnych warunkach eksploatacyjnych i przy odmiennych możliwościach diagnostycznych, dlatego też różne były konsekwencje ich występowania. Na rys. 4.2 pokazano różne podsystemy śruby nastawnej, które ulegają uszkodzeniom podczas sterowania i przekazania mocy na płyty pędnika. Wynikają one z dominujących procesów fizycznych i chemicznych zachodzących podczas przenoszenia energii. Stanowią je naprężenia, relatywnie wysokie ciśnienia, agresywne środowisko wody zaburtowej, niezmiennie wartości ciśnień mediów roboczych, dokładna stabilizacja wartości prądowych.

W poszczególnych podsystemach dominują następujące procesy:

- podsystem oleju roboczego – olej jest nośnikiem energii statycznej ciśnienia, smaruje i uszczelnia jednocześnie współpracujące elementy tego układu, ponadto pełni funkcje myjące i chłodzące w podsystemie, z tego też powodu stawiane są mu wysokie wymagania względem właściwości fizycznej i chemicznej stabilności struktury oraz czystości,
- podsystem powietrza sterującego – powietrze jest nośnikiem wartości zadanej i z tego też powodu wymaga się od tego medium czystości, suchości i odpowiedniego naolejenia, wynika to z delikatnej i precyzyjnej budowy elementów automatyki pneumatycznej oraz wymagane jest, aby zadane wartości ciśnień były stałe pomiędzy kolejnymi przesterowaniami,
- podsystem bezpieczeństwa – są to elektroniczne układy kontroli przeciążeń *SG* i śrub nastawnych, zgodności zadanych nastaw z nastawami osiąganymi przez *SN*, rejestracji wartości parametrów mediów roboczych, dlatego też każde przepięcie może spowodować uszkodzenie tego podsystemu, ponadto w niektórych rozwiązaniach zastosowane przekaźniki zadawania i kontroli skoku śruby pracują przy bardzo niskich wartościach napięcia (w zakresie ± 12 V).

Analiza zaistniałych uszkodzeń, uznanych za awarie daje podstawy do wyciągnięcia wniosków, że część z nich można było uniknąć. Przyczyny tych uszkodzeń *SN* można podzielić na kilka kategorii, które można wyróżnić w fazie eksploatacji:

- obsługiwanie, które zawierają zaniechania w zakresie wykonywania czynności zgodnie z instrukcją producenta,
 - brak kontroli jakości powietrza sterującego (zawodnienie, wartości ciśnień, regulacja i stan pracy reduktorów),
 - brak kontroli oleju roboczego (zawodnienie, czystość, temperatura, poziomy w zbiornikach głównych, nieodpowiednie oleje, stałość ciśnień po osiągnięciu przez śrubęadanego skoku),

- przedłużanie czasu pomiędzy poszczególnymi obsługami okresowymi i głównymi,
- używanie niepełnosprawnych / nieoryginalnych części zamiennych,
- niewłaściwe nastawy (przeciążenia płatów, obciążenia elementów poddanych wysokim ciśnieniom oleju roboczego, niewłaściwa regulacja sprzężenia zwrotnego, źle ustawione poziomy alarmowe i zwłoki czasowe przełączeń).
 - użytkowania wynikające z:
 - błędów wynikających z wad konstrukcyjnych,
 - ukrytych wad materiałowych (brak jednorodności struktury materiału w odlewanych płatach śruby, zła obróbka chemiczna, termiczna użytych materiałów na elementy wysoko obciążone),
 - pojawienia się warunków ruchu statku nieodpowiednich do zaprojektowanych kształtów płatów śruby (praca w zakresie działania kawitacji),
 - nieprawidłowego montażu (użycie nieodpowiednich śrub, uszczelnień, niewłaściwe momenty dociągowe śrub, niezachowanie tolerancji spasowań współpracujących elementów nośnych i uszczelniających),
 - źle dobranych elementów podzespołów współpracujących (złe filtry oleju roboczego, brak osuszaczy i naolejaczy oraz międzystopniowych reduktorów powietrza sterującego, źle dobrane chłodnice oleju) .

Uszkodzenia śrub o skoku nastawnym wynikają z wielu uwarunkowań, jak np. błędów ludzkich jak i materiałowo konstrukcyjnych. Ponieważ uszkodzenia te związane są z wysokimi kosztami, jakie będzie ponosił armator, a priorytetem pracy śrub nastawnych jest ich bezawaryjność i trwałość, koniecznym jest podjęcie odpowiednich działań w celu uniknięcia tych awarii lub co najmniej ograniczenia ich występowania. Działania te powinny być prowadzone dwutorowo, a mianowicie konstruowanie i wytwarzanie *SN* przy zastosowaniu materiałów o odpowiednich wymaganiach dla środowiska pracy oraz działania armatorskie zapewniające szkolenie załóg i stosowanie nowoczesnych systemów zarządzania jakością (*ISO*). W pierwszym wypadku armatorzy mogą odstąpić od zakupu zespołów śrub nastawnych, które są obciążone w dużym stopniu awaryjnością, w drugim natomiast uporządkować rzeczywistość eksploatacyjną (aby obniżyć koszty eksploatacyjne wynikające z awarii wskutek podejmowania błędnej decyzji eksploatacyjnej przez operatora *SN*). W obecnej sytuacji eksploatacyjnej potrzebne są działania armatora polegające na szkoleniu załóg, zakupie oryginalnych części zamiennych oraz przestrzeganiu terminów obsługowych.

W zakresie działań dotyczących konstruowania i wytwarzania zawierają się:

- doskonalenie konstrukcji zespołów śrub nastawnych,
- stosowanie coraz nowocześniejszych technologii materiałowych,
- dokładność montażu i prawidłowe pierwsze uruchamianie systemów obsługowych.

W zakresie działań armatorskich zawierają się:

- stosowanie oryginalnych lub polecanych przez producenta *SN* części wymiennych,
- obsługa i dokładność prowadzonych remontów zgodnie z obowiązującą Dokumentacją Techniczno Ruchową (*DTR*),
- doskonalenie kwalifikacji załóg, szkolenia w zakresie obsługi systemów diagnostycznych oraz staranny dobór kadr oficerskich.

W zakresie działań profilaktycznych i udoskonalających systemy eksploatacyjne *SN* zawierają się:

- zastosowanie diagnostyki dla potrzeb eksploatacji tych urządzeń w szerszym zakresie niż to jest aktualnie stosowane,
- ciągły monitoring zachodzących procesów w celu tworzenia bazy danych, które będą użyte do doskonalenia systemu diagnostycznego oraz do analizy i genezy występujących uszkodzeń,

- zastosowanie nowoczesnych metod diagnozowania *SN*, które zawierają metody wibroakustyczne, sztuczne sieci neuronowe, poprzez trwały montaż przetworników diagnostycznych (piezoelektrycznych, tensometrycznych, drganiowych), wykonywanie otworów tam, gdzie to jest możliwe, w celu możliwości wprowadzenia sond przy zastosowaniu endoskopii,
- wprowadzenie w systemy diagnostyczne jednoznacznych wskaźników stanu wykonania zadania (np. poprzez pomiar wartości ciśnienia oleju roboczego i czasu wykonania zadanego skoku, aby uzyskać konkretną wartość liczbową).

Przedstawione propozycje zawierają szeroki zakres działań, lecz są one niezbędne w procesie trwałego i bezpiecznego użytkowania śrub, a po zestawieniu kosztów inwestycyjnych i kosztów strat wynikających z zaistniałych awarii, umożliwiają ustalenie właściwego kierunku działań.

4.6 Uwagi i wnioski

Dla potrzeb tworzenia racjonalnego modelu diagnostycznego śruby nastawnej konieczne jest przeprowadzenie identyfikacji warunków eksploatacji i zmian stanu technicznego tej śruby jako systemu diagnozowanego (*SDN*) oraz określenie jej własności techniczno – eksploatacyjne, które są istotne w procesie tworzenia tego modelu. Opracowany dla potrzeb decyzyjnych w fazie eksploatacji *SN* system diagnostyczny (*SD*) powinien składać się z systemu diagnozowanego *SDN* (śruby nastawnej) przysposobionego do diagnozowania zgodnie z uzyskanymi wynikami identyfikacji już w fazie projektowania oraz niezbędnego do identyfikacji jego stanu technicznego systemu diagnozującego (*SDG*). Poprzez określenie wpływu obciążenia na szybkość i stopień zużycia możliwe jest obliczenie prawdopodobieństwa osiągnięcia wartości granicznych parametrów wskazujących na pojawienie się uszkodzenia śruby nastawnej. Istotne jest, przy tworzeniu modelu diagnostycznego dociekanie genezy wystąpienia awarii, które ułatwi działanie mające na celu podejmowanie takich decyzji, które umożliwią zapobieganie wystąpienia uszkodzenia śruby nastawnej lub w znacznym stopniu ograniczą konsekwencje tych uszkodzeń. Działania takie polegają na identyfikacji stanów technicznych śruby nastawnej, w oparciu o które można określić stany eksploatacyjne, a tym samym racjonalnie sterować procesem eksploatacji tej śruby i w konsekwencji także i statku.

W następnym rozdziale wyodrębniono stany techniczne śruby nastawnej jednoznacznie określające zdolność tej śruby do wykonania zadań eksploatacyjnych, do których została ona przysposobiona w fazie projektowania i wytwarzania.

Rozdział V

5. Zbiór stanów technicznych śruby nastawnej uwzględnionych w modelu diagnostycznym

5.1 Uwagi wstępne

Śruby nastawne (*SN*) są montowane na statkach w celu nadania im ruchu z bezstopniową regulacją ich prędkości, tak więc celem funkcjonalnym *SN* jest ciągle w czasie przenoszenie momentu obrotowego wytworzonego przez *SG* na płyty tejsze śruby w formie naporu zdolnego nadać ruch kadłubowi statku. Poprawność działania *SN* w zespole napędowym statku podczas jej użytkowania zależy od przebiegu procesu użytkowania istniejącego w systemie użytkowania tej śruby. System użytkowania *SN* realizuje zadania zależnie od jej aktualnego stanu technicznego. Jeśli *SN* znajduje się w stanie zdatności, może być użytkowana, a gdy jest w stanie niezdatności, podlega obsłudze, jeśli jest ono ekonomicznie uzasadnione.

Śruba nastawna może być także użytkowana i obsługiwana jednocześnie. Ma to miejsce wtedy, gdy zachodzi potrzeba odtworzenia potencjału użytkowego *SN* w czasie jej działania. Przykładami takiej sytuacji mogą być takie czynności jak np.:

- uzupełnienie oleju roboczego w zbiorniku kompensacyjnym,
- wymiana i/lub czyszczenie filtra oleju roboczego (jeśli w układzie olejowym został zastosowany filtr typu Duplex lub dwa filtry pracujące równolegle),
- wymiana i/lub czyszczenie filtra powietrza w układzie sterowania skokiem *SN* (jeśli zastosowane zostały podwójne filtry powietrza pracujące w układzie równoległym),
- badanie lepkości i zawartości wody w oleju roboczym.

Ponieważ warunki, w jakich *SN* wykonuje swoje zadania, do których została zaprojektowana i wytworzona, silnie zależą od przewidzianego i zaplanowanego procesu obsługiwania oraz od warunków zewnętrznych i zdarzeń losowych, jakie zachodzą w procesie jej użytkowania, należy więc wyspecyfikować użytkowanie jako:

- użytkowanie *SN* w warunkach normalnych, a więc warunkach przewidzianych przez projektanta w zakresie pełnej sprawności możliwości obciążenia i bezpieczeństwa,
- użytkowanie *SN* w warunkach odbiegających od normalnych, czyli w warunkach eksploatacyjnych skomplikowanych (niebezpiecznych, awaryjnych, czasem nawet katastroficznych), gdzie jedynym priorytetem jest zagwarantowanie pracy *SN* w celu zachowania bezpieczeństwa załogi i statku w wymaganym czasie,
- obsługa planowa (profilaktyczna), jest to ten etap eksploatacji, podczas którego nie występują zagrożenia statku i załogi, a prowadzone są jedynie czynności mające na celu odnowienie i przywrócenie stanu pełnej zdatności *SN*,
- obsługa nieplanowa, wykonywana poza terminami obsługi planowej, z powodu nieprzewidzianych sytuacji eksploatacyjnych, wskutek losowych uszkodzeń, celem której jest przywrócenie co najmniej stanu zdatności częściowej, aby możliwe było utrzymanie bezpieczeństwa ludzi i statku przez wymagany czas, np. dopłynięcie do miejsca możliwej obsługi lub utrzymanie stanu częściowej zdatności do najbliższego przeglądu planowego.

Warunki, w jakich realizuje swoje zadania *SN* (warunki morskie), które często poprzez kumulację skrajnych zagrożeń dla bezpieczeństwa i struktury konstrukcyjnej tego urządzenia, zmuszają załogę statku do działań w zakresie awaryjnego użytkowania lub każdego innego działania, którego jedynym celem jest bezpieczeństwo ponad zasady właściwego użytkowania i wymogi ochrony środowiska, gdzie jedynym priorytetem jest działanie *SN* nawet w warunkach jej zdatności częściowej (s_2). W warunkach rzeczywistego i skrajnego zagrożenia jest to uzasadnione i dopuszczalne postępowanie użytkownika, pod warunkiem

niepogorszenia stanu, czyli nie przejścia ze stanów zdatności częściowej (s_2) do niezdatności (s_3), czyli stanu, w którym nie będą możliwe żadne działania i w wyniku czego może dojść do katastrofy statku. Tymczasem w warunkach uprawiania żeglugi, wymogiem bezpieczeństwa jest nie tylko zachowanie pływerności i stateczności statku, lecz także jego zdolność napędowej i manewrowej. Warunkiem koniecznym dla bezpieczeństwa jest bezwzględne zachowanie zdolności napędowej i manewrowej SN , co stanowi priorytet w układzie napędowym statku, którego częścią jest śruba.

W pierwszym etapie prac projektowych zespołu napędowego ze śrubą nastawną formułowane są wymagania armatora, wynikające z przeznaczenia statku i rejonu jego działania, a następnie są precyzowane warunki techniczne kształtowania własności eksploatacyjnych śruby łącznie z tworzeniem jej systemu eksploatacji (użytkowania, obsługiwanie). Aktualne wymagania, stawiane przez armatorów oraz uwarunkowania ekonomiczne wymuszają na projektantach i producentach śrub nastawnych optymalizację systemów eksploatacji tego zespołu, którego działanie opiera się na ocenie aktualnego stanu technicznego takiej SN . Takie ujęcie zagadnienia wymaga określenia stanów eksploatacyjnych i technicznych SN , mających wpływ na racjonalną eksploatację SN oraz podejmowanie trafnych decyzji eksploatacyjnych nawet w wyżej opisanych warunkach ekstremalnych, w jakich może znajdować się statek i tym samym śruba nastawna, gdy wiadomo, że stan psychofizyczny załogi pogarsza się w sposób zasadniczy wraz z pogarszaniem się warunków ruchu statku, dlatego zmniejsza się prawdopodobieństwo podjęcia racjonalnych decyzji. Aby spełnić te wymogi, powstać powinien system diagnostyczny (SD), który posłuży do oceny stanu SN , przysposobiony do pomiarów parametrów diagnostycznych, umożliwiających identyfikację wspomnianego stanu. W celu spełnienia tego wymagania należy stworzyć zbiory parametrów diagnostycznych, będących wiarygodnymi nośnikami informacji, odwzorowujących właściwości stanu technicznego SN , umożliwiających tym samym rozróżnianie tych właściwości. Z uwagi na złożoność tego obiektu technicznego i wieloaspektowość jego oceny mogą być tu zastosowane różne metody pomiarowe, różne modele diagnostyczne. Model diagnostyczny SN musi mieć formę czytelną dla użytkownika, może więc być przedstawiony w formie analitycznej, funkcjonalnej lub topologicznej [4, 6, 24, 48, 58, 53, 62, 87]. Model analityczny polega na tworzeniu modelu (opisaniu) pewnego (istniejącego lub mającego powstać) fragmentu rzeczywistości. Najogólniej, model analityczny jest pośrednikiem między rzeczywistością, a systemem informatycznym, utworzonym na bazie tylko tych elementów, które są niezbędne do ich wytworzenia. A więc jest to uproszczone matematyczne odwzorowanie rzeczywistości, co wynika z przyjętych założeń, co jest potrzebne, a co nie i ostatecznie jest odrzucane [27, 36, 58, 63]. W modelach funkcjonalnych [30, 58, 87], struktury danych są modelowane jako matematyczne funkcje, (np. czas przesterowania płatów śruby w zależności od ciśnienia oleju roboczego i wymaganej wartości zmiany nastawy). Wadą modeli funkcjonalnych jest słabe uwzględnienie pojęcia stanu i operacji aktualizacyjnych. Modele topologiczne oparte są na zbiorach punktów nieulegających zmianom w przekształceniach. Z punktu widzenia topologii zbiory, które można przekształcać w siebie za pomocą homeomorfizmu, są zbiorami równoważnymi. Topologia wektorowa oprócz położenia obiektu definiuje również jego związek z innymi obiektami. Tak więc każda forma przedstawienia modelu badanego obiektu reprezentuje swoje wartości poznawcze i badawcze. Utylitarna wartość modelu badanego obiektu zależna jest od formy przedstawienia wyników analizy informacji uzyskanych podczas działania rzeczywistego SD . Z powyższego wynika, że w uwarunkowaniach morskich, najbardziej przydatną formą modelu diagnostycznego SN będzie model topologiczny. Dla jego stworzenia, oprócz stanów technicznych i eksploatacyjnych, należy także określić zadania projektowe śrub nastawnych.

Takie zadanie projektowe składa się zazwyczaj z kilku składowych we wzajemnej zależności szeregowej będących zadaniami ze zbioru zadań $Z^d = \{z^d_1, z^d_2, z^d_3, z^d_4, z^d_5\}$, do których śruba została przysposobiona w fazie projektowania i wytwarzania, z następującą interpretacją:

- $z^d_1 \rightarrow n$ – prędkość obrotowa śruby przy pełnym skoku jazdy morskiej; zadanie umożliwiające nadanie prędkości podróżnej statku i planowanego zadania transportowego polegającego na terminowym dotarciu do celu podróży,
- $z^d_2 \rightarrow u_{min}$ - minimalne zużycie oleju hydraulicznego; zadanie zapewniające efektywność w fazie eksploatacji (osiąganie skutecznego sterowania *SN* i racjonalnych wskaźników ekonomicznych),
- $z^d_3 \rightarrow$ zadanie zapewniające utrzymanie wybranego skoku *SN* niezależnie od działania hydrodynamicznego wody zaburtowej na płaty *SN* w całym zakresie jej pracy,
- $z^d_4 \rightarrow$ zadanie zapewniające wymagania ochrony środowiska naturalnego wynikające z stosowania olejów jako mediów roboczych,
- $z^d_5 \rightarrow$ zadanie umożliwiające uzyskanie wymaganego czasu między planowanymi obsługami głównymi; planowane zadanie utrzymania niezawodności (czyli osiągnięcie obliczeniowego czasu niezawodnego działania).

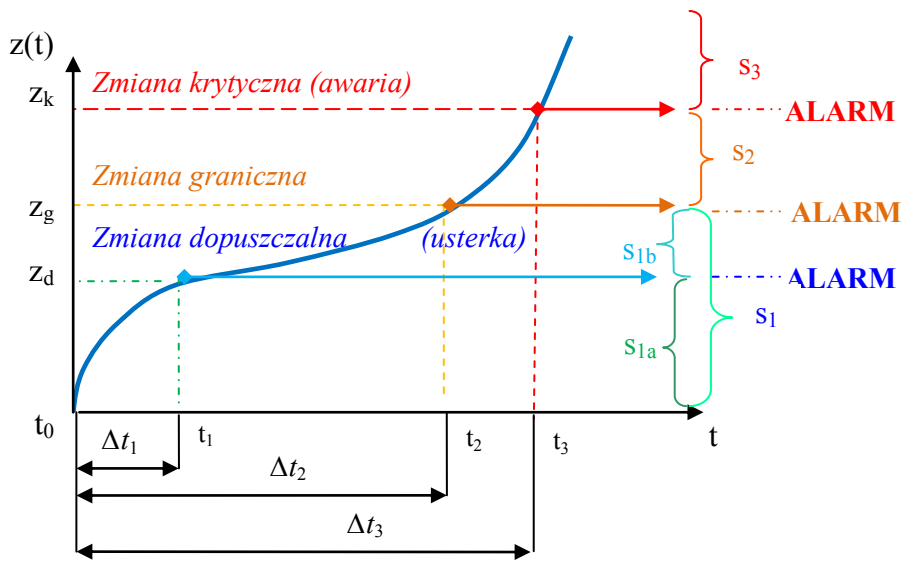
W procesie diagnozowania, przy zastosowaniu modelu topologicznego informacje zapewniane są przez parametry wyjściowe. Wartości ich są odczytywane przez system diagnozujący podczas badania diagnostycznego *SN*, ponadto istotnymi są również informacje uzyskane drogą badań organoleptycznych. Stan *SN* istotnie wpływa na te informacje i są one ściśle od niego zależne. Mogą one przybierać różne formy i mogą być wiarygodne z różnym prawdopodobieństwem. W takiej sytuacji przydatność tych informacji zależeć będzie m.in. od możliwości identyfikacji wyróżnionych stanów technicznych *SN* istotnych dla jego użytkownika.

Z istoty zjawiska zużycia śruby nastawnej, własnych badań empirycznych oraz opisów w literaturze wynika słuszność założenia, że śruba nastawna jako element napędu statku może znajdować się w stanach eksploatacyjnych, które są podzielone na klasy, inaczej zbiory stanów elementarnych, które zostały przedstawione w rozdziale III tej pracy.

Działania diagnostyczne są prowadzone w każdym z wyszczególnionych zbiorów w zakresie, jaki wynika z możliwości diagnostycznych zastosowanych *SDG*, a także czasu dostępnego do podjęcia racjonalnej decyzji eksploatacyjnej. Niezależnie od prowadzonej diagnostyki, w śrubach nastawnych zachodzą zmiany wartości ich stanu technicznego, (np. zużycia tribologiczne elementów śruby w wyniku tarcia, co wpływa na zmianę jej cech użytkowych). Można więc wartości zużycia przypisać czas, w którym to zużycie zachodzi, co zostało pokazane na rys. 5.1

Proces sterowania śrubą nastawną odbywa się za pośrednictwem mediów, jak: sprężone powietrze i olej, które są nośnikami sygnału sterującego (w podsystemie zadawania skoku *SN* za pośrednictwem sprężonego powietrza), siły powodującej zmianę skoku *SN* (w podsystemie wykonawczym zmiany skoku *SN* dokonaną za pośrednictwem oleju hydraulicznego) a także za pomocą elektrycznego sygnału kontrolnego osiągniętej nastawy skoku *SN* (w podsystemie identyfikacji pozycji skoku *SN* wskutek przepływu niskonapięciowego prądu elektrycznego).

Aby śruba nastawna pracowała poprawnie w całym zakresie projektowych nastaw skoku jej płatów, muszą być osiągnięte projektowe wartości parametrów pracy jej podsystemów, szczególnie mediów warunkujących poprawne procesy sterowania *SN*. Zarówno zużycie tribologiczne elementów skojarzonych ruchowo, jak też zużycie uszczelnień, wpływać będzie istotnie na działanie *SN*. Zewnętrznym objawem takiego stanu będzie wydłużony czas przesterowania skrzydeł śruby lub brak osiągnięcia zadanego jej skoku, obniżona wartość ciśnienia oleju roboczego lub brak tego ciśnienia, ubytek oleju w obiegu, obniżona wartość lub brak ciśnienia powietrza sterującego.



Rys.5.1 Przebieg zmian zużycia (z) elementu obiektu technicznego w czasie i wynikający z tego podział stanów technicznych SN na klasy wynikające ze zużycia.

Δt_1 – okres wstępnego zużycia docierania (ewentualna planowa wymiana);

Δt_2 – okres ustabilizowanego zużycia aż do granicznego zużycia (regeneracja);

Δt_3 – okres krytycznego zużycia (katastroficznego, wymuszona pełna wymiana);

s_{1a} – stan pełnej zdadności; s_{1b} – stan pełnej zdadności, lecz z pewnymi ograniczeniami;

s_2 – stan zdadności częściowej; s_3 – stan niezdadności; s_1 – stan akceptowany przez producenta

A zatem mogą one wyznaczać granice przedziałów stanów zdadności SN , jej stan zdadność (s_1), zdadności częściowej (s_2), niezdadności (s_3). Przykładowe wartości graniczne wyszczególnionych parametrów określające działanie SN , w oparciu o badaną SN , przedstawiono poniżej:

Przedział stanu zdadności s_1 może być określony np.:

- czas wykonania zadanej zmiany skoku który wynosi:
STOP \rightarrow CN 7 [sek] STOP \rightarrow CW 6 [sek]
- pozycja wskaźnika mechanicznego skoku śruby:
poz. STOP – „0”
poz. CN – 14-ta działka poz. CW – 12-ta działka
poz. PN – 12-ta działka poz. PW – 8-ma działka
poz. WN – 8-ma działka poz. WW – 6-ta działka
poz. BWN – 6-ta działka poz. BWW – 4-ta działka
- ciśnienie oleju roboczego w stanach:
stan pracy ustalonej 4 MPa; stan fazy zmiany skoku 7 MPa

Przedział stanu zdadności częściowej s_2 może być określony wartościami parametrów zawierającymi się w przedziałach np.:

- czas wykonania zadanej zmiany skoku który wynosi:
STOP \rightarrow CN w przedziale 7 - 14 [sek] STOP \rightarrow CW w przedziale 6 - 14 [sek]
- pozycja mechanicznego wskaźnika skoku SN (mechaniczne sprzężenie zwrotne) powinna zawierać się w przedziale jak niżej:
STOP (+1) - (-1); 1 działka w kierunku Naprzód i 1 działka w kierunku Wstecz skali,
poz. CN – 13 - 14-ta działka poz. CW – 11 - 13-ta działka
poz. PN – 11 - 13-ta działka poz. PW – 7 - 9-ta działka
poz. WN – 7 - 9-ta działka poz. WW – 5 - 7-ma działka
poz. BWN – 5 - 7-ma działka poz. BWW – 3 - 5-ta działka

- ciśnienie oleju roboczego w stanach:
stan pracy ustalonej 4 MPA – 3 MPA; stan fazy zmiany skoku 7 MPA – 5 MPA

Przedział stanu niezdatności s_3 określony byłby wartościami parametrów z poza wcześniej wyznaczonych wartości parametrów stanów s_1 i s_2 , a więc:

- czas wykonania zadanej zmiany skoku SN – powyżej 14 [sek]
- pozycja mechanicznego wskaźnika skoku SN (mechaniczne sprzężenie zwrotne) odbiegająca od wartości projektowych więcej niż 2 działki dla każdej nastawy skoku SN zarówno w zakresie nastaw manewrowych, jak i nastaw jazdy morskiej.

Przyjmując wybrane wartości wyszczególnionych parametrów (jak powyżej), jako wartości graniczne można określić przedziały, które z wystarczającą dokładnością dla praktyki wyznaczają rozpatrywane stany zdadności s_1, s_2, s_3 śruby nastawnej.

Zespół napędowy statku ze śrubą o skoku nastawnym dobierany jest zależnie od kadłuba statku oraz zastosowanego SG w taki sposób, aby charakterystyki pracy tego zespołu były optymalne podczas wykonania zadań, jakie stawiane są danej jednostce pływającej.

Ponieważ SN jest złożonym obiektem technicznym, oczywistym jest zatem to, że poprawność jej działania zależy od poprawności pracy wszystkich jej elementów, podzespołów i układów, oraz od wzajemnego ich oddziaływania na siebie, co wpływa na jakość procesów zachodzących w czasie użytkowania. Dlatego też istotne są stany techniczne wspomnianych elementów, podzespołów i układów SN wpływające na jakość jej pracy, których identyfikacja za pomocą SDG umożliwia stwierdzenie, do jakiej grupy stanów technicznych można zaliczyć aktualny stan SN .

5.2 Zbiór stanów zdadności śrub nastawnych

SN podobnie jak SG [26, 58, 63 86], po etapie pracy, zwanym docieraniem, w którym zachodzi proces wzajemnego ułożenia par skojarzonych ruchowo, ma lepsze własności użytkowe. W etapie tym eliminowane są niektóre niedoskonałości wytwarzania i montażu. Podczas docierania również istnieją ograniczenia związane z ich obciążeniem w fazie eksploatacji wynikające z zaleceń producenta. Po okresie docierania następuje okres użytkowania umożliwiający pełne obciążenie SN , które zostało przewidziane w fazie ich projektowania i wytwarzania. Te spostrzeżenia umożliwiły zbudowanie modeli stanów technicznych SN , które mogą tworzyć czterostanowe bądź trójstanowe zbiory stanów. Z przeprowadzonych rozważań wynika, że najprostszym modelem stanów technicznych SN jest model stanów tworzących trójelementowy zbiór $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ opisany w rozdziale III.

Tak więc można wtedy wyróżnić stan pełnej zdadności $s_1 \in (s_1^{(1)}, s_1^{(2)}, \dots, s_1^{(25)})$ SN , który jest zbiorem o określonej liczności. Zbiór ten zawiera elementy, którym przyporządkowane są wartości projektowe, spełniające wymogi uznane jako „normalne” i zawierające się pomiędzy wartościami granicznymi założonymi i przypisanymi w fazie projektowania do tego stanu normalnego. Wartości te są weryfikowane podczas badań modelowych i w pierwszym etapie eksploatacji, zwanym okresem gwarancyjnym. Określenie elementów $s_1^{(1)}, s_1^{(2)}, \dots, s_1^{(25)}$, jest warunkiem koniecznym do wystąpienia stanu $s_1 \in (s_1^{(1)}, s_1^{(2)}, \dots, s_1^{(25)})$ o następującej interpretacji:

1. Stany techniczne pełnej zdadności elementów mechanizmu zmiany skoku śruby nastawnej ($MZSS$)
 $s_1^{(1)}$ – stan wynikający z zachowania prawidłowych kształtów geometrycznych, wymiarów i pasowań, (zaliczymy tu, wagę elementów mechanizmu, prawidłowy dobór materiałów, prawidłowe skojarzenia ruchowe elementów współpracujących, wyważenie) które zapewniają w normalnych warunkach pracy obliczeniowe opory hydrodynamiczne piasty i płatów śruby, wymaganą siłę do zmiany skoku SN , wynikającą z wartości

- obliczeniowej ciśnienia oleju roboczego dobranego do zastosowanej *SN*, obliczeniowe obciążenie *SG* pochodzące od nastawy *SN* w pełnym zakresie jej użytkowania,
- $s_1^{(2)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganej wartości współczynnika sprężystości użytych materiałów dla układu tłok-tuleja siłownika *MZSS*, co zapewnia prawidłową pracę tego uszczelnienia, obliczeniowy czas wykonania zadania oraz brak istotnej zmiany struktury materiału i odkształceń,
- $s_1^{(3)}$ – stan wynikający z zachowania prawidłowych kształtów geometrycznych i pasowań łożysk płatów *SN*, co zapewni uniknięcie dodatkowych oporów łożyskowania i płynną zmianę zadawanego skoku *SN*,
- $s_1^{(4)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganych wymiarów geometrycznych, pasowania i sprężystości tłoka awaryjnego, co zapewnia możliwość użycia awaryjnego układu sterowania skokiem *SN* przy ręcznym pompowaniu oleju do piasty,
- $s_1^{(5)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganych kształtów geometrycznych grzybka i sprężystości sprężyny zaworu zwrotnego w piaście *SN*,
- $s_1^{(6)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganej wytrzymałości śrub mocujących płyty *SN*,
- $s_1^{(7)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganych wymiarów geometrycznych, kształtu, pasowań i wytrzymałości obliczeniowych na wyboczenie rur teleskopowych doprowadzających olej do odpowiedniej komory roboczej w piaście *SN*,
- $s_1^{(8)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganej sprężystości i wytrzymałości elementów skurczowego sprzęgła typu *SKF*, łączącego połówki wału śrubowego.
2. Stany techniczne pełnej zdatności elementów bloku rozdziału oleju i bloku zaworowego (*BRO* i *BZ*):
- $s_1^{(9)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganej wartości współczynnika sprężystości materiałów użytych na promieniowe uszczelnienie w miejscu wprowadzenia oleju roboczego do obracającego się wału, co zapewnia prawidłowe uszczelnienie i pracę tego uszczelnienia oraz obliczeniowy czas wykonania zadania,
- $s_1^{(10)}$ – stan wynikający z zachowania obliczeniowej wytrzymałości i sprężystości pierścieni odcciążających promieniowego uszczelnienia olejowego, co zapewnia brak istotnej zmiany struktury materiału i odkształceń tych elementów,
- $s_1^{(11)}$ – stan wynikający z dokładności wymiarów i kształtów geometrycznych suwaka sterującego rozrzędem oleju, wpływa zasadniczo na obliczeniową wartość przekrycia kanałów rozdzielacza i tym samym czas, dokładność i stabilność wykonania i utrzymania wartości zadanej ustawionego stoku *SN*,
- $s_1^{(12)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganej sprężystości sprężyny zaworu nadmiarowego w bloku zaworowym, co zapewnia utrzymanie wymaganego ciśnienia roboczego oleju w instalacji,
- $s_1^{(13)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganej sztywności i łożyskowania dźwigni sprzężenia zwrotnego, co zapewnia stabilną pozycję zadanego i wybranego skoku *SN*,
- $s_1^{(14)}$ – stan wynikający z zachowania dokładnych rozmiarów kanałów (kanały przepływu oraz w suwakowym zaworze rozdzielacza skrzyni rozrzędu oleju) i dokładności ich wykonania, co wpływa na poprawną pracę i dynamikę układu starowania, i kompensację hydrodynamicznego oddziaływania wody zaburtowej na płyty śruby,
- $s_1^{(15)}$ – stan wynikający z zachowania obliczeniowej wytrzymałości na ścinanie bolca blokady obrotu zespołu rozrzędu oleju, co zapewnia zdolność wykonania zadania przez zespół napędowy ze *SN*,
3. Stany techniczne pełnej zdatności elementów układu oleju roboczego (*UOR*):
- $s_1^{(16)}$ - stan wynikający z zachowania prawidłowej wydajności pompy oleju roboczego, co zapewnia obliczeniowe dopuszczalne obciążenia elementów układu olejowego oraz obliczeniowe parametry pracy (takie jak obliczeniowa wydajność i ciśnienie pompy

- oleju, moc pobierana przez pompy podczas pracy, która powinna być zawarta w granicach przewidzianych przez projektanta),
- $s_1^{(17)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganych własności fizyko-chemicznych oleju roboczego, (takich jak odpowiednia gęstość, zawodnienie, obliczeniowe ciśnienie robocze),
- $s_1^{(18)}$ – stan wynikający z zachowania poprawnej pracy chłodnicy oleju, co zapewnia utrzymanie na właściwym poziomie stanu temperaturowego czynnika roboczego i elementów układu omywanego olejem roboczym,
- $s_1^{(19)}$ – stan wynikający z zachowania poprawnej pracy filtrów oleju roboczego, co zapewnia właściwą pracę układów skojarzonych ruchowo,
4. Stany techniczne pełnej zdadności elementów układu powietrza sterującego (*UPS*):
- $s_1^{(20)}$ – stan wynikający z odpowiedniej sprężystości sprężyn redukcyjnego zaworu sterującego (zadajnik skoku), gwarantującego generowanie odpowiedniego sygnału do bloku rozrządu oleju, odpowiadającego wybranej pozycji dźwigni zadania skoku *SN*,
- $s_1^{(21)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganej sprężystości sprężyny redukcyjnego zaworu zasilania układu, zapewnia utrzymanie obliczeniowej wartości ciśnienia powietrza sterującego,
- $s_1^{(22)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganej sprężystości sprężyny i membrany zadajnika skoku *SN*, co zapewnia osiągnięcie skoku śruby odpowiadającego aktualnej pozycji dźwigni tego zadajnika,
- $s_1^{(23)}$ – stan wynikający z pełnej zdadności zaworu wyboru miejsca sterowania, (który określają właściwe wymiary oraz kształt kanałów i suwaka tego zaworu jak również wymagana sprężystość sprężyny), co zapewnia utrzymanie wybranej pozycji sterowania w całym okresie pracy *SN* z wybranego miejsca, do chwili następnego przesterowania, a tym samym zapewnia wymagane bezpieczeństwo podczas manewrowania statkiem,
- $s_1^{(24)}$ – stan wynikający z zachowania dopuszczalnego zawodnienia i zaolejenia powietrza sterującego, aby zapewnić płynną pracę układu sterowania sprężonym powietrzem i niedopuszczyć do korozyjnego jego oddziaływania,
5. Stan pełnej zdadności technicznej elementów należących do układu kontrolno – pomiarowego (*UKP*):
- $s_1^{(25)}$ – stan wynikający z zachowania prawidłowych cech: struktury warstwy wierzchniej materiałów, wymiarów geometrycznych i własności fizyko-chemicznych elementów stosowanych w układach kontrolno pomiarowych (takich jak mieszki, kapilary, średnice kanałów pomiarowych mediów kontrolnych, elementy układów elektronicznych np. tensometrycznych, piezoelektrycznych, termoelektrycznych, czujek wibracyjnych),
- $s_1^{(26)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganych wartości prądowych i oporności układu kontroli i przekazania informacji o pozycji skoku *SN*,

5.3 Zbiór stanów częściowej zdadności śruby nastawnej

Stan niepełnej (częściowej) zdadności *SN* charakteryzuje się występowaniem nieprawidłowości działania jednego lub kilku jej podzespołów, które mogą kumulować się, powodując pogorszenia wskaźników eksploatacyjnych, mogą przekroczyć wartości graniczne, co jeszcze nie uniemożliwia wykonania zadania przez *SN*, do jakich została przysposobiona w procesie projektowania i wytwarzania. Stan s_2 : $s_2^{(1)}, s_2^{(2)}, s_2^{(3)}, \dots, s_2^{(27)}$ zdefiniowany jest jako stan częściowej zdadności. Do stanu tego należą stany elementarne s_2^i , $i=1,2,\dots,16$, które nastąpiły w wyniku osiągnięcia stanów granicznych przez elementy *SN* określonych przez wartości granicznych wymiarów geometrycznych lub wartości granicznych parametrów należących do zbioru wartości ograniczonych obustronnie, mianowicie z jednej strony wartością graniczną (uznaną przez producenta jako wartość alarmowa) z drugiej zaś wartością

określoną jako graniczną (uznaną przez producenta jako krytyczną). Wartość graniczna jest niepożądaną, wymagającą podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej, dotyczącą zmiany zadań, jak np. zmiana skoku *SN* lub odstawienie układu napędowego z pracy w celu wykonania wymaganych czynności obsługowych. Stany takie powodują sytuację, w której statek wykona stawiane mu zadanie, mimo przekroczenia kosztów eksploatacyjnych, np. wskutek nieplanowanej wymiany oleju roboczego lub ciągłego jego uzupełniania, poniesionych kosztów dodatkowo wskutek dłuższego czasu rejsu między portami, obsługowych oraz możliwych kosztów wynikłych z kary za zanieczyszczenie środowiska np. wyciek oleju z piasty *SN*. Są to stany, w których statek dalej może wykonywać postawione mu zadania przez czas niezbędny do dopłynięcia do najbliższego bezpiecznego postoju w celu wykonania obsługi. Możliwa jest także alternatywnie dalsza eksploatacja *SN* do kolejnej planowanej obsługi, przy założeniu, że nie nastąpi zmiana stanu *SN* ze stanu częściowej zdatności (s_2) *SN* do jej stanu niezdatności (s_3). Takie stany techniczne zespołu *SN* wymagają szczególnej uwagi, dużej wiedzy ze strony załogi, aby w odpowiednim czasie podjąć uzasadnioną eksploatacyjnie i adekwatną do stanu technicznego decyzję z zakresu użytkowania tego urządzenia. Do najistotniejszych stanów niezdatności bądź zdatności częściowej można zaliczyć stany:

1. stany techniczne częściowej zdatności elementów mechanizmu zmiany skoku śruby nastawnej (*MZSS*):
 - $s_2^{(1)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez elementy piasty wartości kształtów geometrycznych, wymiarów i spasowań, które zawierają się w zbiorze wymiarów geometrycznych, określonych z jednej strony wartością graniczną, (przekroczenie obliczeniowych oporów hydrodynamicznych elementów piasty i śruby, co wymagać będzie zwiększonej siły do zmiany skoku *SN*), z drugiej zaś wartością krytyczną, wynikającą z osiągnięcia przez elementy układu wartości nieakceptowanych przez producenta (przekroczenie luzu tłok-tuleja *MZSS*, co powodować będzie wydłużenie czasu osiągnięcia zadanej wartości nastawy *SN* i niestabilność jej pozycji),
 - $s_2^{(2)}$ – stan wynikający z utraty wymaganej wartości współczynnika sprężystości użytych materiałów dla układu tłok-tuleja siłownika *MZSS*, co może powodować odkształcenia sprężyste/trwałe tłoków piasty mogące zakłócić prawidłową pracę tego układu, spowodować pogorszenie jego uszczelnienia, wydłużenie obliczeniowego czasu wykonania zadania oraz zmianę struktury materiału użytych do wykonania tych elementów. Wartości te zawierają się w przedziałach granicznych dopuszczalnych i akceptowanych przez producenta,
 - $s_2^{(3)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez tłok awaryjny wartości kształtów i wymiarów geometrycznych, spasowań zawierających się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony krytyczną, nieakceptowaną przez projektanta, co spowodować może osiągnięcie niepełnej nastawy skoku naprzód przy awaryjnym ustawieniu płatów *SN*,
 - $s_2^{(4)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez łożyskowanie płatów śruby wymiarów i kształtów geometrycznych oraz spasowań wartości zawierających się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością krytyczną nieakceptowaną przez projektanta, co może doprowadzić do zbyt powolnej zmiany zadawanego skoku płatów *SN*,
 - $s_2^{(5)}$ – stan wynikający z utraty wymiarów geometrycznych i wytrzymałości obliczeniowej wału śrubowego oraz utrata wymaganego kształtu geometrycznego, wymiarów, spasowań (elementów współpracujących rur teleskopowych, ułożenia i łożyskowania wału) co może zwiększyć czas i zmniejszyć dokładność wykonania zadanego skoku jak i zwiększyć obliczeniowy moment obrotowy potrzebny do

wykonania zadania, przy czym wartości wspomnianych wielkości zawierają się w zbiorze wartości dopuszczalnych i akceptowanych przez producenta,

$s_2^{(6)}$ – stan wynikający z przekroczenia wartości obliczeniowych wytrzymałości i sprężystości śrub mocujących, konstrukcji płatów, mogących skutkować pęknięciem lub utratą części płata, śruby mocującej, ale jeszcze nieeliminujące wykonanie zadania, co oznacza osiągnięcie stanu technicznego SN wynikającego z naruszenia struktury technicznej, ale bez przekroczenia wartości krytycznej pęknięcia, umożliwia zachowanie bezpieczeństwa statku,

$s_2^{(7)}$ – stan wynikający z utraty częściowej szczelności posadowienia płatów SN , ale zachowujący jeszcze dopuszczalny stan fizyko-chemiczny oleju roboczego akceptowalny przez konstruktora, co umożliwia wykonanie zadania przez SN ,

$s_2^{(8)}$ – stan wynikający z utraty wymaganej sprężystości sprężyny zaworu zwrotnego w układzie smarowania piasty śruby, ale zawierającej się w zbiorze wartości określonych z jednej strony wartością graniczną, z drugiej strony wartością krytyczną, ale jeszcze akceptowaną przez producenta, co może skutkować zakłóceniami w prawidłowym kierunku przepływu oleju roboczego podczas awaryjnego ustawienia skoku płatów lub znacznym ograniczeniem wykonania wymaganego zadania,

$s_2^{(9)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez elementy układu korbowego $MZSS$ wymiarów geometrycznych i kształtu, zawierających się w zbiorze wartości określonych z jednej strony wartością graniczną, z drugiej wartością krytyczną, akceptowaną przez projektanta i umożliwiającą jeszcze wykonanie zadania.

2. stany techniczne częściowej zdadności elementów skrzyni rozrządu oleju (SRO):

$s_2^{(10)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez suwak rozrządu oleju wartości granicznych wymiarów i kształtu, zawierających się w zbiorze wartości określonych z jednej strony wartością graniczną, z drugiej wartością krytyczną, nieakceptowaną przez projektanta, (co może spowodować zacieranie się suwaka zaworu rozrządu oleju, nieprawidłowe przesłonięcie kanałów dolotowych/wylotowych zaworu rozrządu oleju, a w efekcie zakłócenia w sterowaniu skokiem śruby i niestabilności zadanego skutku).

$s_2^{(11)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez parametry struktury materiałowej elementów zaworu bezpieczeństwa wartości, zawierających się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością wskazującą na osiągnięcie parametrów nieakceptowanych przez producenta, wymagających podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnych w zakresie zmian zadań eksploatacyjnych SN , np. stan wynikający z przekroczenia granicznej wartości współczynnika sprężystości sprężyny zaworu bezpieczeństwa i zmianę struktury materiału sprężyny lub jej pęknięcia uniemożliwiającego przesterowanie skoku SN .

$s_2^{(12)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez elementy dźwigni sprzężenia zwrotnego pozycji tłoka roboczego, kształtów i wymiarów geometrycznych o wartościach należących do zbioru wartości, zawierający się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej wartością wskazującą na osiągnięcie stanu nie akceptowanego przez producenta i wymagającą podjęcia decyzji eksploatacyjnych w zakresie zadań eksploatacyjnych SN , np. stan wynikający z przekroczenia wymiarów granicznych elementów jego łożyskowania, na skutek granicznego zużycia, co skutkować będzie pulsacyjną pracą $MZSS$, a tym samym i cyklicznie zmiennym obciążeniem SG ,

$s_2^{(13)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez parametry struktury materiałowej elementów promieniowego uszczelnienia ślizgowego wartości, zawierających się w zbiorze wymiarów geometrycznych ograniczonych z jednej strony wartością krytyczną, a z drugiej strony wartością wskazującą na osiągnięcie wymiarów nieakceptowanych przez producenta i wymagających podjęcia decyzji eksploatacyjnych w zakresie zmiany zakresu zadań eksploatacyjnych SN , np. stan wskazujący na dążenie do utraty ciągłości

- materiałowej łożysk ślizgowych, pierścieni odciążających lub ich pęknięcie, co może doprowadzić do trwałej deformacji elementów tego uszczelnienia ślizgowego,
3. stany techniczne częściowej zdatności układu oleju roboczego:
 - $s_2^{(14)}$ – stan wynikający z naruszenia struktury fizyko-chemicznej oleju roboczego, a objawiający się zmianą parametrów fizyko-chemicznych oleju (np. zawodnienie oleju, wypłukanie środków uszlachetniających, zanieczyszczenie cząstkami stałymi) zawierających się w zbiorze wartości ograniczonych, określonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej wartością sygnalizującą osiągnięcie krytycznej nieakceptowanej przez producenta, co wymagać będzie natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej dotyczącej częściowej wymiany oleju lub zmiany zakresu zadań eksploatacyjnych SN z powodu osiągnięcia przez układ niestabilnej pracy oraz pojawienie się korozji, a w efekcie pojawienie się zatarcia skojarzonych ruchowo elementów układu SN ,
 - $s_2^{(15)}$ – stan wynikający z osiągnięcia wartości współczynnika sprężystości sprężyny zaworu bezpieczeństwa, zawierającej się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną a z drugiej strony wartością sygnalizującą osiągnięcie wartości krytycznych nieakceptowanych przez producenta, co wymaga podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej, a taki stan skutkować może pulsacyjnym lub ciągłym upływem oleju z przestrzeni roboczej do skrzyni sphywowej, nieosiągnięciem wymaganego ciśnienia oleju dla zmiany skoku SN przez układ roboczy oleju, a tym samym ograniczeniem zakresu nastaw skoku SN w stosunku do wartości, do jakich została przystosowana w fazie projektowania i wytwarzania,
 - $s_2^{(16)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez elementy układu olejowego kształtów i wymiarów geometrycznych o wartościach zawierających się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartościami granicznymi, z drugiej zaś wskazującej na osiągnięcie wartości nieakceptowanej przez producenta i wymagających podjęcia decyzji eksploatacyjnych w zakresie zadań stawianych SN , np. stan wynikający z przekroczenia granicznych wymiarów geometrycznych spowodowany zużyciem elementów roboczych pompy oleju, powodujący brak osiągania wymaganej wydajności i ciśnienia roboczego układu olejowego, w efekcie ograniczenie zakresu pracy SN ,
 - $s_2^{(17)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez chłodnicę oleju roboczego wartości zawierających się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartościami granicznymi, a z drugiej strony wartościami alarmowymi nieakceptowanymi przez producenta, (co może skutkować przegrzaniem oleju roboczego, pojawieniem się nieszczelności w układzie chłodzenia oleju, jego zawodnienie), stan taki wymaga podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej o dokonaniu odnowy chłodnicy,
 - $s_2^{(18)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez parametry struktury materiałowej elementów układu smarowania łożyskowania płatów SN wartości zawierających się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartościami granicznymi, a z drugiej wartością nieakceptowaną przez producenta, wskazującą na konieczność podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej w zakresie zmiany zadań eksploatacyjnych SN , np. stan wynikający z przekroczenia granicznej wartości współczynnika sprężystości zaworu przeciw-ciśnienia, co skutkuje niewystarczającym lub brakiem smarowania łożyskowania płatów SN , a w efekcie jego uszkodzeniem przyjmującym formę nawet zniszczenia,
 4. Stany techniczne częściowej zdatności pneumatycznego układu sterowania SN :
 - $s_2^{(19)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez parametry struktury materiałowej elementów układu pneumatycznego sterowania SN wartości należących do zbioru ograniczonego z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej wartością wskazującą na osiągnięcie wartości nieakceptowanych przez producenta, i wymagającej podjęcia decyzji eksploatacyjnej w zakresie zmiany zakresu eksploatacji SN , np. stan wynikający z

przekroczenia spójności materiałowej membrany redukcyjnego zaworu zadającego skok SN , powodujący zmianę korelacji pomiędzy wartością zadaną skoku a wartością rzeczywiście osiąganego skoku SN ,

$s_2^{(21)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez elementy zaworu redukcyjnego powietrza sterującego wartości parametrów struktury materiałowej, należących do zbioru ograniczonego z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej wartością wskazującą na osiągnięcie wartości nieakceptowanych przez producenta, i wymagającej podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej w zakresie zmiany zakresu eksploatacji SN np. stan wynikający z przekroczenia spójności materiałowej, a w efekcie pojawienie się perforacji i utraty wymaganego współczynnika sprężystości przez membranę, co skutkować będzie ponadnormatywnym zużyciem powietrza sterującego i zakłóceniem ruchu płatów śruby w czasie wykonania zadania oraz brakiem stabilności zadanego skoku SN ,

$s_2^{(23)}$ – stan wynikający z utraty wymaganej sprężystości sprężyny zaworu wyboru miejsca sterowania, która zawiera się w zbiorze wartości określonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością wskazującą na osiągnięcie wartości nieakceptowanych przez producenta, co wymaga podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej w zakresie zmian zadań eksploatacyjnych SN , ponieważ utrata wymaganego współczynnika sprężystości tej sprężyny skutkować będzie wydłużonym czasem przekierowania miejsca sterowania lub samoczynną zmianą tego miejsca,

$s_2^{(26)}$ – stan wynikający z osiągnięcia wartości sprężystości sprężyny pneumatyczno – hydraulicznego wzmacniacza sygnału sterującego skokiem śruby, zawierającej się w zbiorze wartości określonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością wskazującą na osiągnięcie wartości nieakceptowanych przez producenta, co wymagać będzie podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej w zakresie zmiany zadań eksploatacyjnych SN , ponieważ stan utraty wymaganej sprężystości tej sprężyny skutkować będzie samoczynną zmianą wartości sygnału zadającego.

5. stan częściowej zdadności technicznej elementów należących do układu kontrolno – pomiarowego:

$s_2^{(27)}$ – stan wynikający z osiągnięcia przez układ kontrolno-pomiarowy wartości parametrów struktury konstrukcyjnej należących do zbioru wartości ograniczonych z jednej strony wartościami granicznymi, a z drugiej strony wartościami krytycznymi, które powodują osiągnięcie stanu nieakceptowanego przez producenta SN , co jest związane z np. utratą klasy dokładności (w granicach dopuszczalnych do dalszej eksploatacji) czujników i przyrządów pomiarowych, powodujących niedokładność wykonania pomiarów i zakłócenia w realizacji obsługi planowych, których przyczyną są małe nieszczelności w instalacji pneumatycznej lub niewielkie zakłócenia w jakości prądu zasilającego układ kontrolno-sterujący.

5.4 Zbiór stanów niezdatności śruby nastawnej

Stany niezdatności s_3 ($s_3^{(1)}, s_3^{(2)}, s_3^{(3)}, \dots, s_3^{(10)}$) SN są to stany, które uniemożliwiają jej użytkowanie, czyli zastosowanie do zadań zgodnie z jej przeznaczeniem.

Stany takie wystąpią wskutek uszkodzenia części bądź całego dowolnego podzespołu SN , a także z powodu wykonywania obsługi planowych lub remontowych będących konsekwencją uprzednio powstałych szerokich naruszeń struktury technicznej uniemożliwiających jej ruch. Stan taki może zaistnieć w wyniku np. zatarcia suwaka rozrządu oleju w skrzyni rozrządu oleju, co uniemożliwi przesterowanie SN , a w efekcie unieruchomienie awaryjnego układu przesterowania. Stany opisane poniżej reprezentują takie właśnie naruszenia i należy je zaliczyć do zbioru stanów niezdatności, które mogą być interpretowane następująco:

- $s_3^{(1)}$ – stan wynikający z przekroczenia krytycznych naprężeń sprężyny zaworu zwrotnego w układzie oleju roboczego, co skutkować będzie całkowitą utratą sprężystości lub pęknięciem tej sprężyny, a tym samym utratą ciśnienia tego oleju, w efekcie uniemożliwi pracę układu sterowania skokiem *SN*,
- $s_3^{(2)}$ – stan wynikający z przekroczenia granicznych naprężeń w strukturze materiałowej płatów *SN* prowadzące do przerwania ciągłości materiałowej tych płatów (pęknięcie i lub utrata płata), powodujące wzrost wibracji, które przenoszą się na pozostałe elementy układu *SN* i kadłub statku,
- $s_3^{(3)}$ – stan wynikający z przekroczenia granicznych wartości wymiarów suwaka w rozdzielaczu oleju sterującego, co skutkować będzie brakiem wymaganej szczeliny między krawędziami suwaka i korpusu rozdzielacza, a tym samym brakiem przesterowania skoku *SN*,
- $s_3^{(4)}$ – stan wynikający z przekroczenia granicy wytrzymałości materiału śrub mocujących powodujące poluzowanie i lub utratę płata *SN*, i co za tym idzie, utratę oleju roboczego oraz wzrost wibracji mogących naruszyć strukturę konstrukcyjną zespołu *SN* i linii wałów,
- $s_3^{(5)}$ – stan wynikający z przekroczenia granicznych wartości naprężeń tłoka roboczego w piaście *SN* powodujących jego pęknięcie, a tym samym niemożność sterowania skokiem *SN*,
- $s_3^{(6)}$ – stan wynikający z przekroczenia granicznej wartości zawartości wody i cząstek stałych oraz wartości temperatury oleju roboczego, co skutkować będzie zatarciem elementów konstrukcyjnych skojarzonych,
- $s_3^{(7)}$ – stan wynikający z utraty ciągłości materiałowej (tj. pęknięcia) membrany redukcyjnego zaworu zadającego skok, powodujące stopniowy lub nagły ubytek pneumatycznego sygnału sterującego skokiem *SN*,
- $s_3^{(8)}$ – stan wynikający z przerwy w dostawie energii elektrycznej w układzie zasilania pomp olejowych np. wskutek spalania uzwojeń silników elektrycznych napędzających pompy, zalania silników wodą, ich przeciążeniem, zatarciem łożysk wirników, co skutkować będzie brakiem ciśnienia oleju roboczego w systemie hydraulicznym a tym samym niemożnością sterowania *SN*,
- $s_3^{(9)}$ – stan wynikający z przekroczenia innych granicznych parametrów struktury konstrukcyjnej *SN*, powodujących takie uszkodzenia, jak np.: uszkodzenie oprogramowania układu kontrolno-pomiarowego, (przepalenie przewodów elektrycznych instalacji kontrolno-pomiarowej wskutek zwarcia), uniemożliwiające pracę zespołu napędowego ze *SN*,
- $s_3^{(10)}$ – stan wynikający ze znacznej lub całkowitej utraty oleju w układzie roboczym (np. wskutek rozległego uszkodzenia uszczelnienia osadzenia płatów *SN* w piaście, rozległego pęknięcia skrzyni spływowej oleju) co skutkować będzie niemożnością sterowania *SN*, gdyż olej roboczy w statycznych układach hydraulicznych jest elementem strukturalnym i konstrukcyjnym układu przesterowania skoku *SN*, a więc jego brak stanowi krytyczne naruszenie spójności konstrukcyjnej zespołu i w efekcie niezdatność *SN* do realizacji zadania, do jakiego została zaprojektowana i wytworzona.

Racjonalne sterowanie procesem eksploatacji śrub nastawnych (*SN*) wymaga rozpoznawania ich stanów s_2 (częściowej zdatności) i s_3 (niezdatności). Do tego potrzebny jest odpowiedni system diagnozujący (*SDG*). Przystosowanie takiego systemu diagnozującego do śledzenia zmian stanów s_1 (pełnej zdatności) nie jest konieczne ze względów ekonomicznych (wysoki koszt produkcji i eksploatacji) oraz technicznych (znaczną złożoność konstrukcyjną powodującą zmniejszenie niezawodności urządzeń diagnozujących (*SDG*)).

Z tego powodu w eksploatacji *SN*, jako systemów diagnozowanych (*SDN*), dąży się do uzyskania informacji czy:

- nastąpił (pojawił się) stan *SN* nienależący do s_1 ,
- stan *SN* uznany za nienależący do s_1 należy zakwalifikować do stanu s_2 , czy s_3 .

W fazie eksploatacji *SN* istotne jest jeszcze ustalenie prawdopodobieństwa tego, że przez czas potrzebny (niezbędny) do wykonania zadania przez statek stan *SN* będzie stanem s_1 .

Z wymienionych powodów należy więc opracować także zbiór parametrów diagnostycznych dla potrzeb identyfikacji stanów *SN*, aby można było stwierdzić, że znajduje się ona w stanie s_2 bądź s_3 . Zagadnienie to zostało podjęte w następnym rozdziale.

5.5 Uwagi i wnioski

Opisane powyżej stany techniczne przedstawiono w oparciu o kryteria pozwalające na określenia wzajemnych zależności czynników mających wpływ na poprawną pracę zespołu *SN* oraz wielokryterialną ocenę jednoznacznie określonych nieprawidłowości w działaniu śruby nastawnej.

Zidentyfikowanie stanów technicznych w diagnostyce wymaga określenia i zastosowania wskaźników umożliwiających rozpoznanie tych stanów. Służące do tego celu parametry diagnostyczne powinny szybko i jednoznacznie ukazywać zaistniałą zmianę stanu technicznego oraz szybkość jej zachodzenia. Aby to zapewnić należy podzielić na możliwe do zajścia stany na grupy stanów i do tych grup dobrać parametry diagnostyczne, których wartości powinny być rejestrowane przez urządzenia pomiarowe systemu diagnozującego (*SDG*) o wymaganych klasach dokładności. Tak określone parametry zostały opisane w następnym rozdziale.

Zarówno ze względów technicznych, jak również ekonomicznych nie jest możliwe opracowanie tak licznych parametrów diagnostycznych a zarazem mierzenie ich wartości z właściwą dokładnością dla potrzeb diagnostycznych, aby można było zidentyfikować wszystkie stany należące do zbiorów stanów s_2 oraz s_3 , które w tej pracy nazywane są wprost stanami. To zagadnienie zostało przedstawione w następnym rozdziale.

Rozdział VI

Zbiór parametrów diagnostycznych identyfikacji stanów technicznych śruby nastawnej

6.1 Uwagi wstępne

W fazie eksploatacji obiektów energetycznych, w tym śrub nastawnych (*SN*), źródłem poznania ich cech fizycznych i własności użytkowych są pomiary wskaźników ich działania, bezpośrednie bądź porównawcze, które charakteryzują działanie (pracę) tych obiektów (*SN*). Przyjęte opcje pomiarowe lub opcje wskaźników powinny zawsze być aktywne w odniesieniu do rozwoju uzyskiwanych dokładności i w poszerzeniu funkcji opisu cech obiektu i procesu jego eksploatacji. W związku z powyższym uzyskiwanie i opracowywanie wyników podczas badań empirycznych jest zdeterminowane koniecznością opisu związku stanów technicznych i eksploatacyjnych w czasie.

Tak więc w fazie eksploatacji śruby o skoku nastawnym istotna jest ocena jej stanu w oparciu o przyjęte parametry diagnostyczne i kryteria ekonomiczne, pozwalające na racjonalne sterowanie procesem zmian stanów technicznych śruby tego rodzaju. Działanie w tym względzie wymaga dokonania podziału parametrów diagnostycznych na zbiory, według ich przydatności do identyfikacji stanów odwzorowanych przez te parametry. Poniżej opisane zbiory tych parametrów charakteryzują zmiany, które są rezultatem istnienia różnorodnych procesów fizycznych i chemicznych, często zależnych od siebie lub będących odpowiednim następstwem.

6.2 Zbiór parametrów termodynamicznych

W trakcie wykonywania zadań przez śrubę nastawną zachodzą procesy wymiany energii cieplnej pomiędzy czynnikiem roboczym a komponentami konstrukcyjnymi jej struktury. Wzrost temperatury czynnika roboczego zachodzi w następstwie pracy pompy oleju (ściskanie pompowanego oleju) jak i w wyniku wytwarzanego ciepła wskutek tarcia, skojarzonych par kinematycznych, które jest znaczne wtedy, jeśli zostanie przerwany film olejowy pomiędzy nimi. Temperatura układu o wartości spoza przedziału wartości obliczeniowych, ale akceptowanych przez producenta, oddziałuje negatywnie na strukturę materiałową elementów konstrukcyjnych śruby nastawnej, oraz na stan fizyko-chemiczny oleju roboczego. Tak więc analiza tych parametrów, zwłaszcza (termodynamicznych), służy do opisanego przebiegu procesów wymiany ciepła, jak i stanu współpracujących elementów struktury materiałowej lub mediów roboczych, które mają wpływ na zachodzące procesy cieplne w śrubie nastawnej podczas wykonywania zadań.

W świetle powyższego przyjęto następujący podział parametrów termodynamicznych:

- a. parametry termodynamiczne, opisujące stan współpracujących elementów układu olejowego:
 - temperatura elementów konstrukcyjnych piasty i mechanizmu zmiany skoku śruby,
 - temperatura elementów uszczelnienia promieniowego mechanizmu rozrzędu oleju,
 - temperatura oleju smarującego współpracujące pary kinematyczne skojarzone ruchowo.
- b. parametry termodynamiczne opisujące stan mediów mających wpływ na zachodzące procesy w przestrzeni roboczej śruby nastawnej:
 - temperatura czynnika roboczego,
 - ciśnienie czynnika roboczego,

- zawartość wody w czynniku roboczym,
- lepkość czynnika roboczego,
- ciepło właściwe czynnika roboczego.

Przyjęcie powyższego kryterium ułatwi identyfikację niesprawności, a tym samym podjęcie właściwej decyzji eksploatacyjnej, mającej istotny wpływ na utrzymanie stanu pełnej zdatności lub częściowej zdatności śruby nastawnej.

6.3 Zbiór parametrów wibroakustycznych

Śruba nastawna (SN) jak każdy obiekt techniczny, charakteryzuje się indywidualnymi cechami fizycznymi, które stanowią charakterystyczne właściwości sprężyste i inercyjne. Są one stałe i określone dla stanu normalnego obiektu technicznego, stanu równowagi sprężystej struktury konstrukcyjnej jego elementów. Naruszenie tej równowagi działaniem czynników zewnętrznych lub w wyniku zmiany struktury wewnętrznej elementów SN generuje drganie cząstek, wywołując ruch falowy. Fale rozchodzące się w ośrodku sprężystym charakteryzowane są przez wiele parametrów, jak: amplituda, częstotliwość, prędkość, przyśpieszenie, tłumienie (przez otoczenie), kierunek rozchodzenia, czy ciśnienie akustyczne (w przestrzeniach zamkniętych). Pod wpływem zmian geometrycznych, fizycznych i materiałowych śruby nastawnej następuje rozproszenie, ugięcie, dyfrakcja, czy interferencja tych fal, tworząc widmo charakterystyczne dla ośrodka, w którym się rozchodzą. Ponieważ uszkodzenie elementu konstrukcyjnego śruby nastawnej jest takim wymuszeniem, wielkości te mogą być uznane za nośniki informacji, a więc można nazwać je parametrami wibroakustycznymi. Oddziaływanie fal sprężystych w rejonie uszkodzenia powoduje zmiany sposobu ich rozchodzenia (np. zmiana kierunku, odbicie) oraz ich charakteru (zmiana amplitudy, tłumienie), obrazując tym samym stan techniczny śruby, zależnie od rozległości naruszenia jej struktury konstrukcyjnej. Parametry wibroakustyczne mogą i dostarczają informacji odnośnie stanów układów skojarzonych ruchowo. Zmiany wartości tych parametrów są wynikiem wzrostu luzów wskutek zużycia elementów. W wyniku zużycia pojawiają się: zmiana struktury materiału (z którego wykonane są elementy konstrukcyjne) pod wpływem temperatury, ubytki materiałowe płatów śruby wskutek korozji kawitacyjnej, naruszenie ciągłości struktury materiałowej-pęknięcie). W celu określenia stanu technicznego SN przyjęto następujące rodzaje parametrów wibroakustycznych [6, 48, 52, 74]:

- amplituda widma drgań,
- kierunek rozchodzenia się pola wibroakustycznego,
- ciśnienie akustyczne,
- zakres częstotliwości dźwięków,
- szerokość spektrum częstotliwości drgań,
- częstotliwość widma wibroakustycznego.

Porównując pomierzone wartości parametrów wibroakustycznych z wzorcowymi wartościami, możemy wnioskować o miejscu i rozległości naruszenia struktury konstrukcyjnej SN, co ma znaczący wpływ na podjęcie odpowiedniej decyzji eksploatacyjnej.

6.4 Zbiór charakteryzujący własności fizyko – chemiczne olejów w systemach sterowania skokiem śruby nastawnej

W układach hydrostatycznych, przenośnikiem energii ciśnienia, a więc elementem wykonującym zmianę położenia tłocznika *MZSS*, a tym samym zmianę skoku *SN*, jest olej roboczy. Aby mógł być on zastosowany w tych układach, musi sprostać wielu wymaganiom. Zbiór parametrów charakteryzujący własności fizyko-chemiczne olejów roboczych określa

własności eksploatacyjne, informując o jego zdolności do zapewnienia poprawnej pracy układu wykonawczego zmiany skoku, jak mechanizmu obrotu skrzydeł (MOS) śruby nastawnej, odporności na działanie warunków wykonywania zadania, zdolności do smarowania powierzchni elementów współpracujących. Skład chemiczny analizowanych próbek oleju może wskazywać na obniżenie lub utratę jego zdolności do ochrony antykorozyjnej, a struktura fizyczna oleju może wskazywać na zużycie elementów konstrukcyjnych (analiza zawartości mikrocząsteczek) oraz obniżenie jego zdolność do przenoszenia wysokich ciśnień przy zachowaniu podstawowych własności fizycznych [17, 42, 49, 56, 71, 73, 74, 76, 104].

Do głównych parametrów fizyko-chemicznych oleju roboczego należą:

- lepkość kinematyczna,
- lepkość dynamiczna,
- smarowność,
- ściśliwość (powinna być mała, czyli wysoka wartość modułu sprężystości objętościowej),
- przewodnictwo cieplne (powinno być duże),
- rozszerzalność cieplna (powinna być mała),
- trwałość i odporność chemiczna szczególnie na działanie wysokich ciśnień (powinna być duża),
- niska temperatura krzepnięcia,
- niska rozpuszczalność powietrza,
- brak skłonności do pienienia i tworzenia emulsji wodnych,
- brak toksyczności i łatwość biodegradacji w zetknięciu ze środowiskiem naturalnym (brak),
- obojętność chemiczna wobec stosowanych materiałów w układach hydraulicznych.

Powyżej przedstawione cechy fizyko-chemiczne cieczy hydraulicznej, jaką jest olej roboczy, są możliwe do pomierzenia i przedstawienia w formie konkretnej liczby i jednostki miary lub wykresów. Pomierzone wartości wspomnianych wielkości stanowią zbiór danych, charakteryzujących stan tego nośnika energii.

6.5 Uwagi i wnioski

Decyzji eksploatacyjne, podejmowane szczególnie w zmiennych i trudnych do przewidzenia warunkach morskich, powinny być podejmowane z uwzględnieniem probabilistycznych relacji diagnostycznych między wyróżnionym stanem a parametrami diagnostycznymi. Informacja o stanie SN jest przydatna do podejmowania decyzji eksploatacyjnych jeżeli zostaną jej przyporządkowane wartości wiarygodności diagnozy o stanie technicznym śruby nastawnej s_1 , s_2 , oraz s_3 . Wiarygodność bądź też trafność tych decyzji ma szczególne znaczenie w przypadku zastosowania do podejmowania decyzji statystycznej teorii decyzji. Zagadnienie to zostało podjęte w rozdziale VIII.

W normalnych warunkach eksploatacyjnych symptomy typowych zmian stanów technicznych są jednoznaczne i opisane w DTR dla SN i w takich przypadkach wystarczające jest zastosowanie przygotowanych przez producenta procedur postępowania. Stanowi to najprostsze i najmniej pracochłonne działanie załogi eksploatującej SN , które zależne jest od jej doświadczenia. Jednakże w eksploatacji zachodzą również stany, w których opracowane procedury są niewystarczające do określenia stanu technicznego [Zał. nr.2]. W takich sytuacjach, w celu określenia rzeczywistego stanu technicznego SN , wymagana jest większa liczba parametrów diagnostycznych i możliwości ich interpretacji, w celu opracowania wiarygodnej bądź trafnej diagnozy. W związku z tym opracowanie zależności dla zbiorów stanów technicznych oraz parametrów diagnostycznych powinno mieć formę relacji

diagnostycznych odwzorowujących zbiór stanów technicznych SN w zbiór parametrów diagnostycznych. Opracowanie takie zostało przedstawione w następnym rozdziale.

Rozdział VII

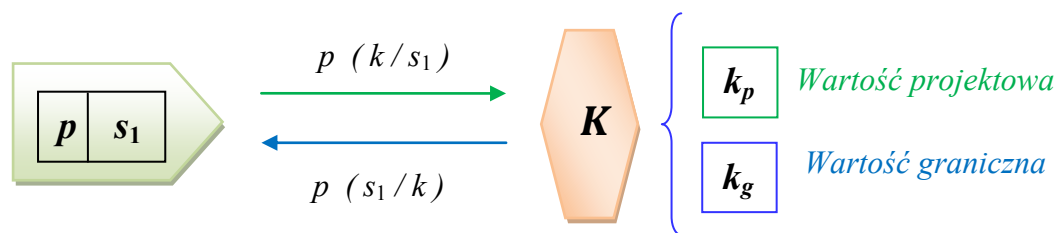
Relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów technicznych śruby nastawnej w zbiór parametrów diagnostycznych

7.1 Uwagi wstępne

Statki uprawiające specjalistyczną żeglugę, jak np. stosowane w ruchu promowym, statki dostawcze, pożarnicze czy holowniki, a więc statki o częstych manewrach, którym stawiane są wysokie wymagania w zakresie manewrowości, są eksploatowane tak, aby możliwe było uzyskanie maksymalnej efektywności co wymaga optymalizacji procesów eksploatacyjnych. Wymagania takie można zapewnić poprzez zastosowanie śrub nastawnych do napędu statków i dlatego są one chętnie stosowane przez armatorów, którzy eksploatują takie statki. Ciągły wzrost zapotrzebowania na napędy statków ze śrubami nastawnymi jest czynnikiem wymuszającym ulepszenia konstrukcyjne i poprawę jakości stosowanych materiałów użytych do ich budowy. Aby sprostać tym wymaganiom już w fazie ich projektowania, przyjmowane są pewne bazowe parametry służące do obliczeń wynikowych parametrów pracy i obciążeń. Parametry takie są weryfikowane na stanowiskach badawczych podczas prób modelowych, finalnie podczas eksploatacji po zainstalowaniu na jednostce pływającej. Uzyskane podczas testów parametry, są przyjmowane jako podstawowe, ponieważ są one ściśle powiązane ze stanem technicznym i energetycznym SN , gdyż odwzorowują własności podzespołów i układów w swoich wartościach. Jednak własności SN ulegają zmianie w czasie eksploatacji. Aby te zmiany śledzić, trzeba opracować relacje diagnostyczne ujawniające związki między stanami diagnostycznymi, sygnalizującymi te zmiany.

7.2 Relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów pełnej zdatności w zbiór parametrów diagnostycznych

Relacje między wyróżnionymi stanami technicznymi s_i ($i = 1,2,3$) dowolnej śruby nastawnej a parametrami technicznymi są bardzo istotne w procesie diagnozowania i podejmowania decyzji eksploatacyjnych. Taki przykładowy graf obrazujący te relacje dla stanu pełnej zdatności s_1 śruby nastawnej i wektora parametrów diagnostycznych przedstawiono poniżej na rys 7.1.



Rys. 7.1 Przykładowy graf modelu diagnostycznego dla stanu pełnej zdatności (s_1) śruby o skoku nastawnym: p – prawdopodobieństwo wystąpienia stanu s_1 ; s_1 – stan pełnej zdatności śruby nastawnej; k – parametr diagnostyczny; $p(k/s_1)$ – prawdopodobieństwo warunkowe oznaczające, że obserwowana będzie wartość parametru k pod warunkiem, że istnieje stan s_1 ; $p(s_1/k)$ – prawdopodobieństwo, że istnieje stan s_1 pod warunkiem zaobserwowania wartości parametru k ; k_p – wartość projektowa parametru k ; k_g – wartość graniczna parametru k

W fazie użytkowania aktywnego śruby nastawnej mogą zachodzić następujące relacje odwzorowujące w zbiór parametrów diagnostycznych poniższe stany techniczne:

$s_1^{(1)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganych luzów, wymiarów i pasowań układu *MZSS*, określonych przez projektanta, które mogą być odwzorowane w zbiór następujących parametrów diagnostycznych:

k_1 – wartość grubości filmu olejowego na powierzchni tulei i tłoka *MZSS*, mieszcząca się pomiędzy wartością projektową (obliczeniową) i wartością graniczną,

k_2 – wartość odchyłek od wartości zadanej pozycji skoku *SN*, (oscylacja wokół wartości zadanej zawierająca się w wartościach projektowych) mieszcząca się w przedziale pomiędzy wartościami granicznymi,

k_3 – wartość czasu uzyskania zadanego skoku *SN* zawierająca się w przedziale pomiędzy wartościami projektowymi (granicznymi),

k_4 – wartość ciśnienia oleju roboczego w chwili dochodzenia do wartości zadanej i ustalonej pozycji skoku śruby nastawnej, mieszcząca się w przedziale pomiędzy wartościami granicznymi.

$s_1^{(2)}$ – stan wynikający z zachowania wymaganej szczelności elementów układu olejowego i obrotowego uszczelnienia promieniowego bloku rozdziału oleju bloku zaworowego (*BRO* i *BZ*) charakteryzowany jest przez:

k_5 – wartość ciśnienia oleju roboczego, zawierająca się w przedziale pomiędzy wartościami projektowymi i granicznymi,

k_6 – wartość minimalnego ciśnienia oleju roboczego, określoną przez projektanta, zawierająca się w granicach wykonalności zmiany skoku *SN*, odpowiadającą pełnemu wychyleniu jej płatów, mieszcząca się w przedziale wartości granicznych,

k_7 – wartość czasu wykonania zmiany skoku *SN* z pozycji aktualnej do zadanej zawierająca się w przedziale wartości granicznych,

k_8 – wartość ciśnienia oleju smarującego piastę, zawierająca się w przedziale pomiędzy wartościami projektowymi i granicznymi,

k_9 – ilość (poziom) oleju roboczego w zbiorniku wyrównawczym, zawierający się w pomiędzy wartościami oznaczonymi jako eksploatacyjne (projektowe),

$s_1^{(3)}$ – stan wynikający z zachowania własności fizyko-chemicznych oleju roboczego śruby nastawnej może być odwzorowany w następujące parametry diagnostycznych:

k_{10} – wartość temperatury oleju roboczego mieszcząca się pomiędzy wartością projektową (obliczeniową) i wartością graniczną,

k_{11} – wymagane projektowe wartości poziomu oleju w zbiorniku grawitacyjnym i obiegowym mieszczące się w przedziale pomiędzy wartościami granicznymi,

k_{12} – wartość ilości wody w oleju roboczym zawierająca się w zakresie wartości dopuszczalnych i określonych przez projektanta,

k_{13} – wartość lepkości oleju roboczego zawierająca się w przedziale między wartościami granicznymi przyjętymi przez projektanta,

k_{14} – wartość ilości zanieczyszczeń stałych w oleju roboczym, zawierająca się w granicach dopuszczalnych określonych przez projektanta,

k_{15} – wartości osiąganych ciśnień przez pompy oleju roboczego, zawierające się w przedziale wartości granicznych wyznaczonych przez projektanta,

k_{16} – wartości ciśnień otwarcia/zamknięcia zaworu bezpieczeństwa, zawierające się w przedziale wartości granicznych określonych przez projektanta,

k_{17} – wartość przeciwcisnienia oleju w obiegu, zawierająca się w przedziale wartości pomiędzy wartością projektową (obliczeniową) i graniczną,

$s_1^{(4)}$ – stan wynikający z zachowania pełnej zdatności pneumatycznego układu starowania śrubą nastawną charakteryzowany przez:

k_{18} – wartość ciśnienia powietrza wejściowego do układu sterowania, zawierająca się w przedziale wartości granicznych określonych przez projektanta,

k_{19} – wartości ciśnienia powietrza sterującego wychodzącego z redukcyjnego zaworu zadającego skok, odpowiadająca przypisanym wartościom nastaw skoku śruby nastawnej, zawierająca się w zakresie wartości granicznych (projektowych) dla poszczególnych pozycji nastaw skoku,

k_{20} – wartość ilości wody w powietrzu sterującym, zawierająca się w przedziale wartości granicznych dopuszczalnych określonych przez projektanta,

k_{21} – wartość ciśnienia powietrza sterującego nastawą skoku SN , zawierająca się w przedziale wartości granicznych, odpowiadająca wartości tego ciśnienia w chwili zadziałania układu redukcji płatów śruby od przeciążenia SG określona przez projektanta,

k_{22} – wartość czasu zadziałania wykonawczego układu olejowego, od chwili zadania sygnału pneumatycznego do chwili rozpoczęcia zmiany skoku, zawierająca się w zakresie wartości granicznych (projektowych).

$s_1^{(5)}$ – stan wynikający z zachowania pełnej zdatności układu kontrolno-pomiarowego, charakteryzujący się parametrami pracy o wartościach zawierającymi się między wartościami granicznymi przedziału wartości projektowych normalnej pracy, jest odwzorowany w następujących parametrach diagnostycznych:

k_{23} – klasa dokładności mierników i zachowanie kształtu sygnału diagnostycznego zawierające się w przedziale między wartościami granicznymi.

$s_1^{(6)}$ – stan wynikający z zachowania pełnej struktury materiałowej i konstrukcyjnej płatów śruby nastawnej może być odwzorowane następującymi parametrami diagnostycznymi:

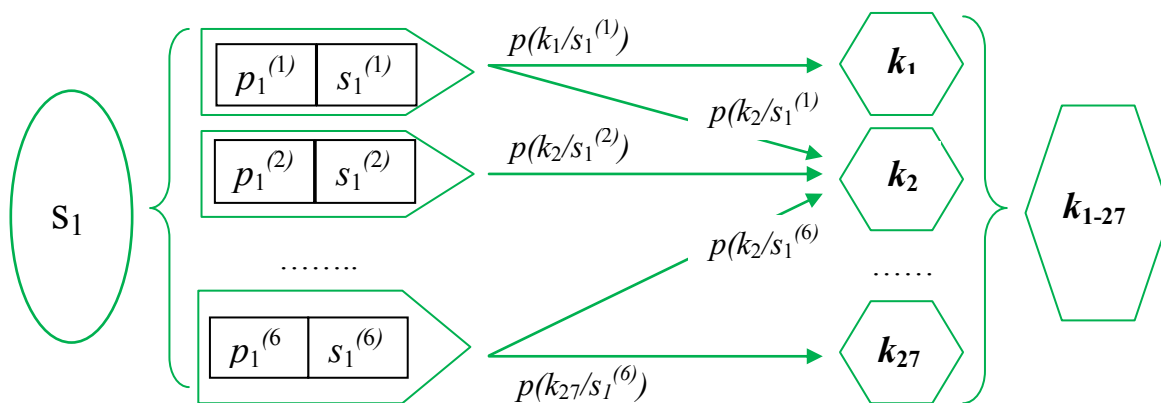
k_{24} – wartość amplitudy drgań (przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń) wału śrubowego, zawierająca się w zakresie wartości granicznych określonych przez projektanta,

k_{25} – wartość wskaźnika obciążenia silnika napędu głównego odpowiadająca wartości projektowej MCR i odpowiednim wartościom pośrednim powyżej obciążeń manewrowych,

k_{26} – wartość momentu skręcającego wału śrubowego w zakresie obciążeń pomiędzy CN manewrowa i CN jazdy morskiej, zawierająca się w granicach wartości projektowych,

k_{27} – wartość osiągniętych prędkości statku, odpowiadająca przypisanym projektowym wartościom dla poszczególnych nastaw skoku śruby nastawnej, mieszcząca się w przedziale wartości projektowej i granicznej dla wyszczególnionych nastaw skoku śruby.

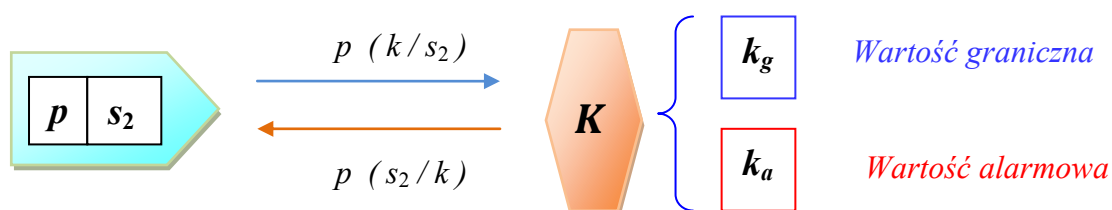
Opisane stany $s_1^{(i)}$ śruby nastawnej i parametry diagnostyczne odwzorowujące te stany k_j , przy czym $i=1,2,\dots,6$ natomiast $j=1,2,\dots,27$ można skojarzyć odpowiednimi relacjami, które powinny mieć własności probabilistyczne. Odwzorowanie stanów $s_1^{(i)}$ ($i=1,2,\dots,6$) w parametry diagnostyczne k_j ($j=1,2,\dots,27$) zostało przykładowo przedstawione na rys. 7.2.



Rys.7.2 Probabilistyczne relacje między wyróżnionymi stanami technicznymi śruby nastawnej a parametrami diagnostycznymi: $p_1^{(i)}$ – prawdopodobieństwo wystąpienia stanu $s_1^{(i)}$; $s_1^{(i)}$ – stan SN ze zbioru s_1 ($s_1^{(1)}, s_1^{(2)}, \dots, s_1^{(6)}$) $p(k/s_1^{(i)})$ – prawdopodobieństwo wystąpienia parametru diagnostycznego k_i przy wystąpieniu stanu $s_1^{(i)}$, k_i – parametr diagnostyczny,

7.3 Relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów częściowej zdatności w zbiór parametrów diagnostycznych

W fazie eksploatacji śrub nastawnych mogą zachodzić sytuacje, w których stany częściowej zdatności tych śrub nie eliminują jej z procesu użytkowania i wykonanie zadania jej przypisanego jest możliwe, choć z pewnymi ograniczeniami lub po wykonaniu czynności przywracających jej stan pełnej zdatności. Dlatego, aby rozpoznać rodzaj stanu s_2 takiej śruby, potrzebne są relacje odwzorowujące w zbiór parametrów diagnostycznych tego rodzaju stany techniczne. Przykładowy wykres obrazujący probabilistyczne relacje między wyróżnionym stanem technicznym s_2 dowolnej SN a parametrem diagnostycznym k został przedstawiony na rys. 7.3



Rys. 7.3 Przykładowy graf modelu diagnostycznego dla stanu częściowej (s_2) zdatności SN: p – prawdopodobieństwo wystąpienia stanu częściowej zdatności s_2 ; s_2 – stan śruby nastawnej; k – parametr diagnostyczny; $p(k/s_2)$ – prawdopodobieństwo warunkowe oznaczające, że nastąpi zmiana parametru k pod warunkiem, że zajdzie stan s_2 ; $p(s_2/k)$ – prawdopodobieństwo, że istnieje stan s_2 pod warunkiem zaobserwowania zmian wartości parametru k

$s_2^{(1)}$ – stan wynikający z osiągnięcia wartości luzów, wymiarów i pasowań elementów MZSS, należących do zbioru wymiarów ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej wartością alarmową określoną przez projektanta, uznaną za wartość nieakceptowaną, mogąca powodować znaczne ograniczenia sterowania skokiem śruby nastawnej, co wymaga podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej w zakresie możliwości realizowania zadania przez śrubę nastawną, mogą być odwzorowane w następujących parametrach:

- k_{28} – wartość grubości filmu olejowego na gładzi tulei i tłoka *MZSS*, należąca do zbioru wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, wymagającą podjęcia natychmiastowych decyzji eksploatacyjnych w zakresie zadań postawionych przed śrubą nastawną,
- k_{29} – wartość odchyłek odbiegająca od wartości zadanej pozycji skoku *SN*, zawierająca się w granicach wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, co powodować będzie niepożądaną oscylacyjną pracę układu wokół wartości zadanej skoku śruby,
- k_{30} – wartość czasu wykonania zadanej skoku *SN*, zawierająca się w granicach zbioru wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, mogącą zagrażać bezpieczeństwu manewrowemu statku, co wymaga podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnych dotyczących zakresu zadań eksploatacyjnych śruby,
- k_{31} – wartość ciśnienia oleju roboczego w chwili ustalonej pozycji skoku śruby nastawnej, zawierająca się w przedziale wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a drugiej wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, i wymaga podjęcia natychmiastowych decyzji eksploatacyjnych w zakresie zadań eksploatacyjnych śruby nastawnej.
- $s_2^{(2)}$ – stan wynikający z utraty wartości wymaganej sprężystości elementów konstrukcyjnych obrotowego uszczelnienia promieniowego skrzyni rozrządu oleju, która jest w przedziale ograniczonym z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, co doprowadzić może do znacznego pogorszenia procesu sterowania śrubą. Stan ten może być odwzorowany w następujących parametrach:
- k_{32} – wartość ciśnienia oleju roboczego, zawierająca się w granicach zbioru wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta,
- k_{33} – wartość minimalnego ciśnienia oleju roboczego, zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, co może spowodować znaczne ograniczenia w wykonaniu zadania przez *MZSS*,
- k_{34} – wartość czasu wykonania zmiany skoku *SN*, z pozycji w której aktualnie znajduje się śruba nastawna do nowej zadanej pozycji skoku, zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, co może powodować poważne niebezpieczeństwo dla statku podczas jego manewrów w porcie, jak i przejściach kanałowych oraz podczas żeglugi w warunkach sztormowych,
- $s_2^{(3)}$ – stan częściowej zdadności układu oleju roboczego, i smarującego zespołu śruby nastawnej może być odwzorowany w następujących parametrach:
- k_{35} – wartość temperatury oleju roboczego zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej wartością alarmową nieakceptowaną przez projektanta, która może spowodować rozległe naruszenia struktury technicznej śruby nastawnej,
- k_{36} – wartość ilości oleju roboczego w zbiorniku roboczym i grawitacyjnym, zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością

graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta,

k_{37} – wartość ilość zawartości wody w oleju roboczym, zawierająca się w zbiorze wartości określonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, która może spowodować szerokie naruszenie struktury materiału elementów *SN* wskutek działania korozyjnego wody morskiej zawartej w oleju roboczym, jak i wypłukania dodatków uszlachetniających olej roboczy,

k_{38} – wartość ilość zawartości zanieczyszczeń stałych w oleju roboczym, zawierająca się w zbiorze ilości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez producenta, która może doprowadzić do ograniczenia przepływu oleju roboczego przez filtr, oraz może spowodować zacięcie/zatarcie suwaka zaworu rozdziału oleju *MZSS*,

k_{39} – wartości osiągniętych ciśnień przez pompy oleju roboczego, zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, która może doprowadzić do znacznego ograniczenia zdolności manewrowej śruby nastawnej (w granicach wartości znamionowych wyznaczonych przez projektanta) oraz zdolności utrzymania zadanej pozycji skoku podczas pełnej jazdy morskiej,

k_{40} – stan wynikający z osiągnięcia przez pompę oleju wydajności, zawierającej się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, sygnalizującą potrzebę podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej w zakresie działania *SN*,

$s_2^{(4)}$ – stan częściowej zdadności pneumatycznego układu starowania śrubą nastawną może być odwzorowany w następujących parametrach:

k_{41} – wartość ciśnienia powietrza sterującego wejściowego do układu sterowania, zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, która może doprowadzić do znacznych zakłóceń w sterowaniu skokiem śruby nastawnej,

k_{42} – wartość ciśnienia powietrza sterującego, wychodzącego z pneumatycznego zadajnika skoku, zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, co może ograniczyć precyzyjność wybierania wyszczególnionych (oczekiwanych) nastaw skoku śruby nastawnych, stanowiące duże zagrożenia bezpieczeństwa, szczególnie podczas ruchu manewrowego statku, oraz powoduje utratę kontroli nad rzeczywistym zadawanym skoku *SN*,

k_{43} – wartość ilości wody w powietrzu sterującym, zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta,

k_{44} – wartość ciśnienia powietrza sterującego nastawą skoku *SN*, zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, odpowiadającą wartości redukcji obciążenia *SG*, co jest niezbędne dla ochrony napędu głównego przed przeciążeniem.

$s_2^{(5)}$ – stan wynikający z osiągnięcia zużycia granicznego przez elementy układu kontrolno – pomiarowego, którego parametry pracy o wartościach należących do zbioru wymiarów ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej wartością alarmową, sygnalizującą stan wartości nieakceptowanych przez projektanta, co wymaga podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej, dotyczącej zakresu zadań eksploatacyjnych SN , stan ten może być odwzorowany w następujących parametrach diagnostycznych:

k_{45} – klasa dokładności umożliwiająca zachowanie kształtu sygnału diagnostycznego o wartościach należących do zbioru wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta, wymagająca podjęcia natychmiastowych decyzji eksploatacyjnych, dotyczących zadań SN , np. zanik sygnałów diagnostycznych lub zaobserwowanie nieuzasadnionych zmian wartości parametrów.

$s_2^{(6)}$ – stan wynikający z naruszenia struktury materiałowej i konstrukcyjnej płatów śruby nastawnej, której parametry zawierają się w przedziale ograniczonym z jednej strony wartościami granicznymi, a z drugiej strony wartościami alarmowymi, sygnalizują osiągnięcie stanu nieakceptowanego przez projektanta, oraz konieczność podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej, dotyczącej zakresu zadań eksploatacyjnych, jakie są możliwe do wykonania (np. pęknięcie płata śruby i wynikające z tego drgania mogące doprowadzić do uszkodzenia łożyskowania zespołu śruby nastawnej) stan ten może być odwzorowany przez następujące parametry diagnostyczne:

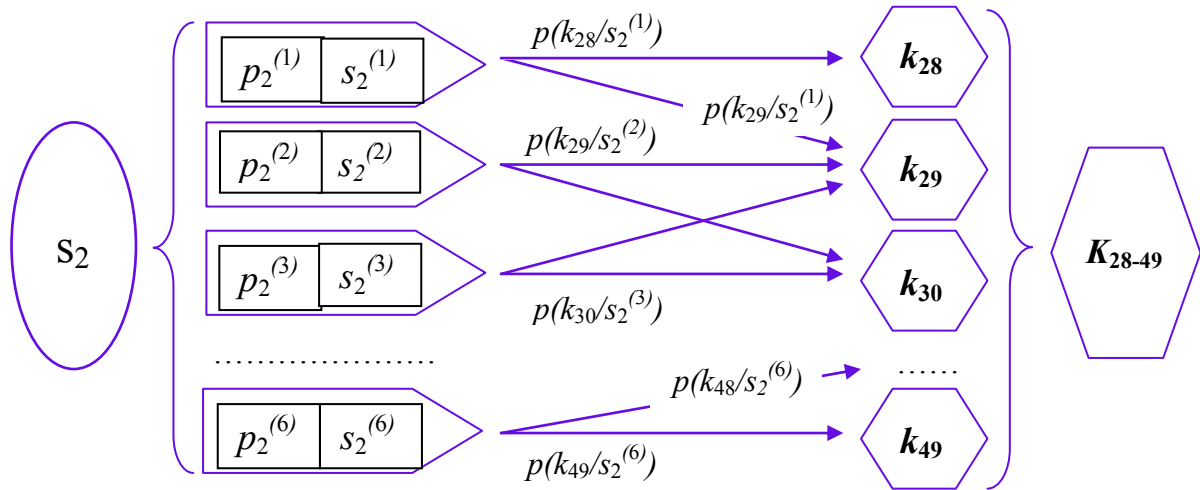
k_{46} – wartość drgań wału śrubowego, zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartościami granicznymi, a z drugiej strony wartościami alarmowymi nieakceptowanymi przez projektanta, co może spowodować szerokie naruszenie struktury konstrukcyjnej zespołu śruby nastawnej,

k_{47} – wartości osiąganej maksymalnej możliwej nastawy skoku śruby, zawierająca się w przedziale wartości ograniczonych z jednej strony wartościami granicznymi, a z drugiej strony wartościami alarmowymi nieakceptowanymi przez projektanta, zapewniająca możliwość wykonania zadania z zachowaniem bezpiecznego poziomu drgań śruby nastawnej (np. możliwość obciążenia śruby podczas jazdy w ciężkich warunkach pogodowych),

k_{48} – wartość momentu skręcającego wału śrubowego w zakresie obciążeń: od „CN manewrowa” do „MCR” silnika głównego, zawierająca się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową nieakceptowaną przez projektanta,

k_{49} – wartości ciśnień otwarcia/zamknięcia zaworu bezpieczeństwa wskutek częściowej utraty sprężystości sprężyny tego zaworu, zawierające się w zbiorze wartości ograniczonych z jednej strony wartością graniczną, a z drugiej strony wartością alarmową, nieakceptowaną przez projektanta co może doprowadzić do znacznego ograniczenia możliwości wykonania zadania przez śrubę nastawną, oraz konieczności podjęcia natychmiastowej decyzji eksploatacyjnej.

Opisane stany $s_2^{(i)}$ śruby nastawnej ($i=1,2,\dots,6$) i parametry diagnostyczne odwzorowujące te stany k_j ($j = 28, 29,\dots,49$) można powiązać za pomocą odpowiednich relacji probabilistycznych. Odwzorowanie wspomnianych stanów $s_2^{(i)}$ w parametry diagnostyczne k_j zostało, jako przykład, przedstawione na rys. 7.4.



Rys.7.4 Probabilistyczne relacje między wyróżnionymi stanami technicznymi (s_2) śruby nastawnej a parametrami diagnostycznymi k_i : $p_i^{(j)}$ – prawdopodobieństwo wystąpienia stanu $s_i^{(j)}$; $s_i^{(j)}$ – stan SN ze zbioru s_2 ($s_2^{(1)}, s_2^{(2)}, \dots, s_2^{(6)}$), $p(k/s_i^{(j)})$ – prawdopodobieństwo wystąpienia parametru diagnostycznego k_i przy wystąpieniu stanu $s_i^{(j)}$, k_i – parametr diagnostyczny,

7.4 Relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór stanów niezdatności w zbiór parametrów diagnostycznych

Proces eksploatacji okrętowych śrub (SN) o skoku nastawnym, oprócz stanów zdatności i zdatności częściowej, charakteryzuje się również stanami niezdatności (s_3). Śruba nastawna w takim stanie nie nadaje się do wykonania zadania, jakie są przed nią stawiane. Stan niezdatności SN wynika z wielu złożonych czynników eksploatacyjnych, zależnych od użytkownika jak i niezależnych od niego. Jednak istotny wpływ na pojawienie się stanu s_3 mają warunki, w jakich SN realizuje swoje zadania, a stan ten zasadniczo wpływa na bezpieczeństwo statku i dlatego wymagana jest identyfikacja i ocena stanu technicznego śruby, która jest podstawą do podjęcia, możliwej przy takim stanie, racjonalnej decyzji eksploatacyjnej. Podstawą decyzji są relacje diagnostyczne (odwzorowujące zbiór stanów niezdatności w zbiór parametrów diagnostycznych) i wartości pomierzonych parametrów diagnostycznych.

Do zbioru stanów niezdatności (s_3) można zaliczyć następujące stany eksploatacyjne:

$s_3^{(1)}$ – stan wynikający z utraty wartości wymaganych luzów, wymiarów i spasowań układu MZSS, określonych przez projektanta, może być odwzorowany w następujących parametrach:

k_{50} – zanik wymaganego poziomu oleju w zbiorniku grawitacyjnym oleju smarującego, co wskazuje na pęknięcie sprężyny zaworu rozdziału oleju sphywowego i smarującego, a więc i zanik smarowania elementów skojarzonych ruchowo MZSS i piasty śruby,

k_{51} – zbyt duża oscylacyjna praca śruby nastawnej wokół wartości zadanego skoku, przekraczająca wartości akceptowane przez projektanta, co wskazuje na przekroczenie granicznych wartości luzów elementów suwakowego zaworu rozrządu oleju roboczego,

k_{52} – wartość czasu wykonania zadanego skoku SN przekraczająca wartości projektowe,

k_{53} – zatarcie suwaka w zaworze rozdziału oleju roboczego (zatarcie), pomimo wzrostu wartości ciśnienia powietrza sterującego,

k_{54} – zanik wymaganego ciśnienia wykonawczego oleju roboczego wskazują na pęknięcie sprężyny zaworu bezpieczeństwa, a tym samym brak możliwości sterowania skokiem śruby nastawnej,

k_{55} – brak sygnału do przesterowania suwakowego zaworu rozrządu oleju spowodowany ułamaniem lub rozłączeniem na łożyskowaniu dźwigni sprzężenia zwrotnego pozycji tłoka siłownika w piaście śruby.

$s_3^{(2)}$ – stan wynikający z utraty wymaganej sprężystości elementów konstrukcyjnych obrotowego uszczelnienia promieniowego (np. sprężystego pierścienia odciążającego) skrzyni rozrządu oleju może być odwzorowany następującymi parametrami:

k_{56} – wartość ciśnienia oleju roboczego poniżej granicznej dopuszczalnej wartości projektowej, co będzie skutkowało brakiem wykonalności zmiany skoku SN .

$s_3^{(3)}$ – stan wynikający z utraty wymaganych parametrów pracy układu olejowego oraz jego własności fizyko – chemicznych, powodującej skokową sterowność śruby lub brak sterowności śrubą nastawną, korozyjne oddziaływanie na elementy konstrukcyjne omywanych przez ten olej jak i szerokie naruszenie struktury konstrukcyjnej. Stan ten może być odwzorowany w parametrach:

k_{57} – wzrost wartości temperatury oleju roboczego powyżej maksymalnej dopuszczalnej wartości projektowej (obliczeniowej), która powoduje wzrost naprężeń termicznych elementów konstrukcyjnych SN , co może doprowadzić do zatarcia tych elementów,

k_{58} – przekroczenie krytycznej wartości zawartości wody w oleju roboczym, co wskazuje na uszkodzenie chłodnicy oleju lub krytyczne rozszczelnienie piasty SN ,

k_{59} – wzrost mocy silnika elektrycznego napędzającego pompę oleju roboczego w połączeniu z wyraźnym wzrostem wartości ciśnienia tego oleju na filtrach roboczego układu olejowego, wskazuje na krytyczną zmianę własności fizyko-chemicznych tego medium roboczego,

k_{60} – przekroczenie krytycznej zawartości zanieczyszczeń stałych w oleju roboczym, co wskazuje na skrajne zużycie elementów skojarzonych ruchowo,

k_{61} – wartość osiąganych ciśnień przez pompy oleju roboczego poniżej wartości wykonalności zmiany skoku SN , co wskazuje na uszkodzenie pompy lub zaworu bezpieczeństwa tej pompy,

k_{62} – wyraźna zmiana koloru i lepkości oleju roboczego, co sygnalizuje degradację struktury fizyko-chemicznej tego oleju a tym samym eliminuje go z dalszej eksploatacji w układzie roboczym.

$s_3^{(4)}$ – stan wynikający z utraty zdolności pneumatycznego sterowania śrubą nastawną lub z powstania braku kontroli nad zadaną/wymaganą pozycją skoku:

k_{63} – zanik ciśnienia lub spadek jego wartości znacznie poniżej wymaganej do zapewnienia prawidłowego sterowania procesem zmiany skoku, co wskazuje na uszkodzenie redukcyjnego zaworu powietrza na wejściu do tego układu, które uniemożliwia poprawną pracę tego układu,

k_{64} – zanik lub brak zmiany ciśnienia powietrza sterującego wychodzącego z redukcyjnego zadajnika skoku śruby wskazujące na uszkodzenie tego zaworu (jego sprężyny, membrany lub zaworu iglicowego) a tym samym niemożność wygenerowania sygnału zadającego zmianę skoku SN oraz brak jego kontroli,

k_{65} – przekroczenie dopuszczalnego czasu pracy odwadniacza powietrza sterującego, co wskazuje na wyłączenie z pracy odwadniacza, a w konsekwencji

zablokowanie linii przesyłu tego powietrza (wskutek powstania korków olejowo-wodnych) do elementów zadających i kontrolujących pracę śruby nastawnej,

k_{66} – brak sygnału wyboru miejsca sterowania, spowodowany pęknięciem sprężyny lub spalaniem cewki elektromagnetycznego zaworu przekierowania miejsca sterowania, co powoduje niemożność przekazania tego sygnału sterowania śrubą nastawną lub samoczynną jego zmianę (Mostek ↔ CMK),

k_{67} – samoczynne zmiany zadanej pozycji skoku śruby nastawnej lub samoczynne przesterowanie jej w kierunku pracy „Wstecz”, co wskazuje na pęknięcie sprężyny zaworu suwakowego rozrządu oleju, które powoduje niekontrolowany napęd statku,

k_{68} – brak ciśnienia powietrza sterującego spowodowany uszkodzeniem mechanicznym (pęknięcie, urwanie) przewodów instalacji pneumatycznego sterowania skokiem *SN*, co powoduje nagłe przesterowanie skoku śruby nastawnej w pozycję max „CN”, a tym samym jej niezdolność do pracy.

$s_3^{(5)}$ – stan wynikający z przekroczenia granicznych parametrów struktury konstrukcyjnej przez elementy systemu kontrolno – pomiarowego, nieakceptowanych przez producenta, które powodują ich uszkodzenia (dotyczy to np. oprogramowania, układu stabilizacji zasilania elektrycznego). Uszkodzenia te mogą nastąpić wskutek zwarcia w instalacji elektrycznej zasilającej układ, uniemożliwiając pracę zespołu śruby nastawnej i mogą być odwzorowane w następujących parametrach diagnostycznych:

k_{69} – zanik sygnału wyjściowego z zadajnika skoku śruby nastawnej, co może być spowodowane utratą mediów roboczych (sprężone powietrze) lub zwarciem sterownika elektrycznego zadajnika skoku śruby nastawnej,

k_{70} – czasowy lub całkowity zanik sygnałów kontrolnych jako diagnostycznych systemu kontrolno – pomiarowego.

$s_3^{(6)}$ – stan wynikający z utraty struktury materiałowej i konstrukcyjnej płatów śruby nastawnej, (co powoduje uszkodzenie łożyskowania ułożenia wału śrubowego jak i *MZSS*, a w konsekwencji uszkodzenie uszczelnienia zewnętrznego tego wału i uszczelnienia promieniowego w miejscu wprowadzenia oleju do wnętrza obracającego się tego wału) może być odwzorowany parametrami:

k_{71} – wartość przyspieszeń drgań wału śrubowego przekraczająca wartości graniczne, określone przez projektanta,

k_{72} – wartości odchyłek pozycji wskaźnika obciążenia silnika napędu głównego, przekraczająca wartości projektowe dla nastawy *SG* odpowiadającej *MRC* i odpowiedniej wartości pośrednich obciążenia, będących powyżej obciążeń manewrowych,

k_{73} – wartość momentu skręcającego wału śrubowego w zakresie obciążeń pomiędzy „CN” manewrowa i „CN” morska, przekraczająca graniczne wartości projektowe, co wskazuje na zacieranie się łożyskowania bloku rozrządu oleju lub znaczne uszkodzenie płatów śruby nastawnej,

k_{74} – przekroczenie wartości krytycznych poziomu hałasu wynikającego z pracy uszkodzonej śruby napędowej (utrata płata lub jego części).

$s_3^{(7)}$ – stan wynikający z przekroczenia wartości granicy wytrzymałości materiału jarzma cylindra i pęknięcie (co powoduje swobodny przepływ oleju roboczego pomiędzy dwiema komorami roboczymi, a tym samym brak jakiegokolwiek sterowania/zadania skoku *SN*) lub pęknięcie pokrywy piasty powodujące mieszanie się oleju roboczego z wodą morską lub utratę tego oleju, co stanowi znaczne zagrożenie

dla środowiska morskiego, może to być odwzorowany w następujących parametrach diagnostycznych:

k_{75} – stałe ciśnienie oleju roboczego bez względu na zadawany skok SN oraz brak jego zmiany, pomimo zachowania szczelności układu oleju roboczego,

k_{76} – wzrost ciśnienia oleju smarującego i poziomu w zbiorniku grawitacyjnym bez zewnętrznych wycieków, co wskazuje na pęknięcie jarzma cylindra w miejscu rozdziału obu przestrzeni (smarującej i roboczej),

k_{77} – pojawianie się wody morskiej w oleju roboczym oraz ślady wycieku oleju za burtą, co wskazuje na pęknięcie pokrywy piast, (w takiej sytuacji nie musi nastąpić spadek ciśnienia oleju roboczego, lecz może nastąpić powolny jego ubytek),

k_{78} – brak wzrostu ciśnienia oleju (ponad wartość nominalną) podczas awaryjnego przesterowania skoku śruby przy zachowaniu szczelności układu olejowego.

$s_3^{(8)}$ – stan wynikający z przekroczenia wartości granicznej wytrzymałości na rozciąganie, ścinanie elementów konstrukcyjnych śruby nastawnej (np. śrub montażowych skrzydeł śruby nastawnej z piastą, co powoduje krytyczną utratę jej szczelności) obrazujące rozległym naruszeniem spójności konstrukcyjnej zespołu śruby nastawnej. Stan ten może być odwzorowany w następujących parametrach diagnostycznych:

k_{79} – krytyczny wzrost wartości amplitud przemieszczeń wału śrubowego ponad dopuszczalną wartość projektową z jednoczesnym ubytkiem oleju roboczego w hydraulicznym obiegu roboczym oraz pojawieniem się plam oleju za burtą statku, co jest spowodowane uszkodzeniem uszczelnienia lub płata śruby nastawnej,

k_{80} – krytyczny wzrost zawartości wody w oleju smarującym ponad wartość dopuszczalną, a w konsekwencji również w oleju roboczym, wskutek nagłej lub znacznej utraty szczelności tego obiegu, z powodu krytycznego naruszenia spójności i struktury konstrukcyjnej elementów piasty śruby nastawnej,

k_{81} – widoczne próby obracania się $MZSS$, powyżej zakresu dopuszczalnego, co wskazuje na uszkodzenie/ścięcie bolca blokady obrotu $MZSS$, w następstwie czego, następuje rozległe uszkodzenie struktury konstrukcyjnej tego mechanizmu,

k_{82} – systematyczna utrata oleju w zbiorniku obiegowym SN bez pojawiania się zanieczyszczeń wody zaburtowej, wskazuje na pęknięcie skrzyni zlewowej $MZSS$ co spowoduje utratę oleju roboczego, a tym samym uniemożliwienie sterowania śrubą nastawną.

$s_3^{(9)}$ – stan wynikający z przekroczenia granicznej wartości sprężystości pierścienia sprzęgła SKF (typ tulejowego sprzęgła skurczowego) łączącego odcinki wału śrubowego, doprowadza do degradacji struktury materiałowej tego elementu konstrukcyjnego oraz pojawienia się możliwości samoczynnego wysunięcia się wału śrubowego przy pracy układu w kierunku na „Wstecz”. Stan ten może być odwzorowany w następujących parametrach diagnostycznych:

k_{83} – znaczny wzrost temperatury odcinka wału śrubowego ponad temperaturę otoczenia w części osadzenia tulejowego sprzęgła typu SKF , łączącego odcinki wału śrubowego, ponad wartość projektową, co wskazuje na względny ruch elementów tego sprzęgła a tym samym utratę spójności konstrukcyjnej sprzęgła,

k_{84} – widoczne względne przemieszczenie pierścienia zewnętrznego sprzęgła typu SKF i odcinka wału śrubowego w miejscu zamontowania obu tych elementów (zawiera się tu przemieszczenie promieniowe i osiowe), co wskazuje na utratę spójności konstrukcyjnej połączenia skurczowego odcinków wału śrubowego,

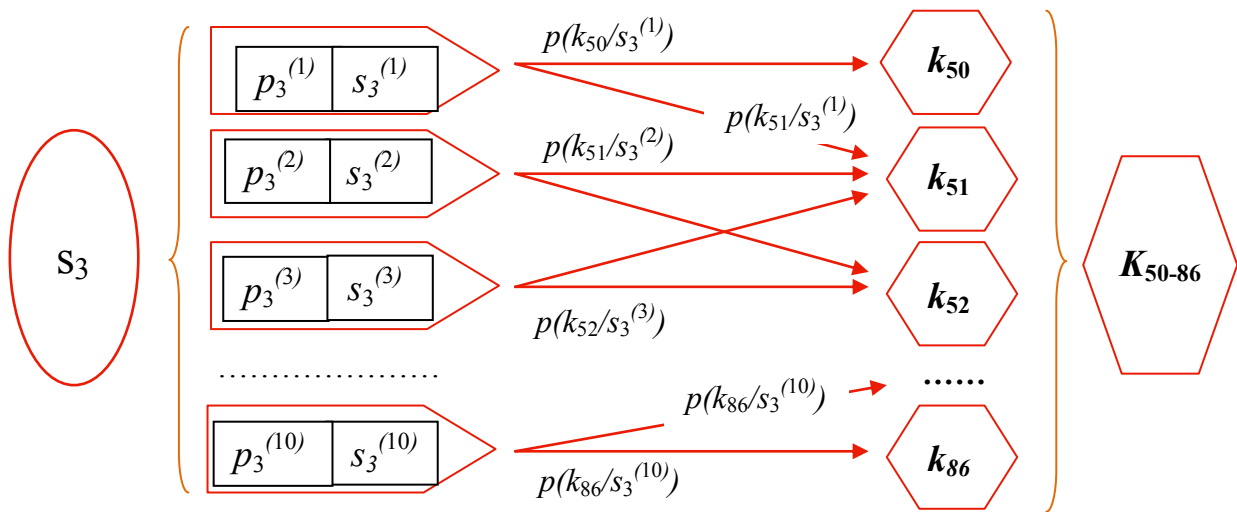
k_{85} – wartość przemieszczenia, wewnętrznego pierścienia wzmacniającego sprzęgła SKF , względem skurczowej tulei zewnętrznej tego sprzęgła ponad

wartość projektową, co wskazuje na utratę spójności konstrukcyjnej tego skurczowego połączenia obu części rurowego wału śrubowego, która może doprowadzić do unieruchomienia zespołu śruby nastawnej.

$s_3^{(10)}$ – stan wynikający z osiągnięcia wartości parametrów pracy przekraczających wartości krytyczne nieakceptowane przez projektanta lub uszkodzenia układu kontrolno – pomiarowego (np. zakłócenia w instalacji elektrycznej). Stan ten może być odwzorowany w parametrze diagnostycznym:

k_{86} – czasowy lub całkowity zanik sygnałów kontrolnych i diagnostycznych, co może wskazywać na uszkodzenie zasilania lub zwarcie w systemie kontrolno pomiarowym.

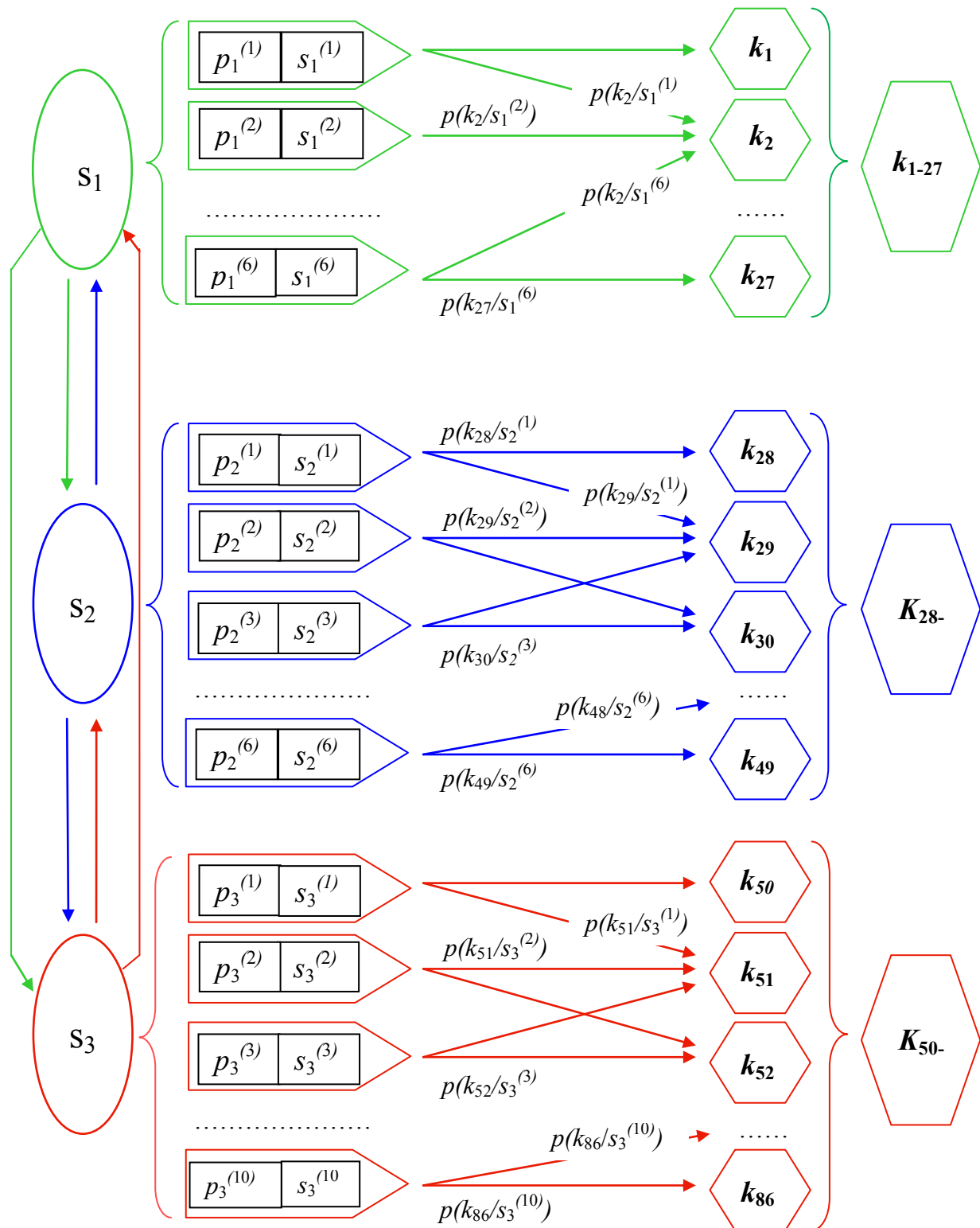
Powyżej opisane relacje dają się interpretować za pomocą grafu, który przedstawiony jest poniżej.



Rys. 7.5 Probabilistyczne relacje między wyróżnionymi stanami technicznymi (s_3) śruby nastawnej a parametrami diagnostycznymi k_i : $p_3^{(i)}$ – prawdopodobieństwo wystąpienia stanu $s_3^{(i)}$; $s_3^{(i)}$ – stan SN ze zbioru s_3 ($s_3^{(1)}, s_3^{(2)}, \dots, s_3^{(10)}$), $p(k_i/s_n^{(i)})$, $n=1,2,3$ – prawdopodobieństwo wystąpienia parametru diagnostycznego k_i przy wystąpieniu stanu $s_i^{(i)}$, k_i – parametr diagnostyczny,

Odwzorowanie zbioru wyróżnionych stanów technicznych śruby nastawnej w zbiór parametrów diagnostycznych umożliwia rozpoznanie wspomnianych stanów $s_n^{(i)}$; $n=1,2,3$; $j=1,2,\dots,86$, za pomocą wyszczególnionych parametrów diagnostycznych. Zbiory tych parametrów odpowiednio skonfigurowane jako wartości, którym przyporządkowano wartości wzorcowe, umieszczone w bazie danych, po przyrównaniu do aktualnych wartości pomierzonych tych parametrów, dają sygnał diagnostyczny, a tym samym umożliwiają podjęcie racjonalnej decyzji eksploatacyjnej. Jednakże z uwagi na różnorodność zachodzących obciążeń SN, zachodzi też taka sama różnorodność przejść z wyszczególnionych stanów technicznych do innego stanu technicznego odpowiadającego aktualnej strukturze technicznej, czy materiałowej elementów konstrukcyjnych tej śruby. Istotnym więc jest przedstawienie tych zależności w jednym grafie takiego modelu diagnostycznego, który zawierałby w sobie stany techniczne istotne dla funkcjonowania śruby nastawnej lub umożliwiające podjęcie adekwatnej do zaistniałej sytuacji decyzyjnej w eksploatacji. Wynika to z faktu, że w trakcie eksploatacji SN może zaistnieć bezpośrednie przejście ze stanu pełnej zdatności do niezdatności, co eliminuje ją z eksploatacji (np. ścięcie blokady obrotu skrzyni zaworowej MZSS, utrata płata śruby nastawnej lub utrata sprężystości tulei zaciskowego sprzęgła SKF, co nawet przy minimalnym obrocie względnym łączonych końcówek rurowego wału śrubowego doprowadza do katastroficznej degradacji tego elementu konstrukcyjnego SN). Z tego powodu w poniższym grafie rys. 7.6 przedstawiono

zachodzące zmiany między wyszczególnionymi stanami, także przy pominięciu stanów przejściowych, jakie można uznać za należące do stanu częściowej zdadności.



Rys.7.6 Relacje w modelu diagnostycznym SN; s_1, s_2, s_3 – klasy stanów SN, nazywane też krótko stanami, k_{ij} – parametr diagnostyczny

7.5 Uwagi i wnioski

Współczesne metody pomiarów wielkości fizycznych dają możliwość bardzo dokładnego pomiaru tych wielkości (pomiaru chwilowe, monitoring w czasie, prezentacja trendów), a tym samym rozpoznania stanów eksploatacyjnych i energetycznych badanej śruby nastawnej [1,4,8,9,54,62]. Przy zastosowaniu współczesnych technik komputerowych w jednakowym stopniu można wykorzystywać już istniejące bazy danych, jak i pozyskiwać nowe parametry pracy śrub nastawnych, wynikające z dostępności nowych metod badawczych, do stworzenia komputerowego systemu diagnozującego. W sytuacji, gdy można uzyskać znaczne licznosci uzyskanych pomiarów, istotnym staje się selekcja tych danych, które dają obraz stanu urządzenia, odłączając je od innych danych niemających istotnego znaczenia, a więc tzw. szumów pomiarowych. Tak wyselekcjonowane parametry diagnostyczne stanowią podstawę do stworzenia modelu diagnostycznego dla śrub nastawnych. Należy mieć na uwadze, przy tworzeniu takiego modelu, że ma on zapewnić informacje użytkownikowi *SN*, które umożliwiają mu podejmowanie racjonalnej decyzji eksploatacyjnej i, co jest istotne, niemal natychmiastowe prezentowanie zaistniałych zmian, jakie zachodzą w układzie śruby nastawnej oraz prezentowanie trendów zachodzących zmian. Wykonany w oparciu o model taki system diagnozujący, przysposobiony do pomiaru, monitorowania i ich przetwarzania, w sposób zasadniczy przyspieszy i ułatwi podjęcie trafnej decyzji eksploatacyjnej, a tym samym przyczyni się do wzrostu efektywności eksploatacyjnej układu śruby nastawnej. Głównym więc celem tworzenia modeli diagnostycznych śrub nastawnych, podobnie jak innych urządzeń technicznych, jest poszukiwanie takich parametrów, których zmiana w jak najkrótszym przedziale czasu i najwyraźniej zasygnalizuje zmianę stanu technicznego śruby nastawnej jako całości, oraz jej układów i elementów konstrukcyjnych. Zużycie struktury konstrukcyjnej śruby nastawnej winno być sygnalizowane według wcześniej przyjętego stopniowania. Sposób sygnalizacji i wizualizacji wyszczególnionych stanów zużycia struktury konstrukcyjnej śruby nastawnej powinien być jednoznaczny, bez możliwości odmiennych interpretacji. Do tego celu powinny być wykorzystane: dźwiękowe systemy sygnalizacji stanów alarmowych, oraz prezentacja zidentyfikowanego stanu śruby nastawnej na monitorze systemu kontroli i nadzoru pracy siłowni, z jednoczesnym zapisem czasu trwania zakłócenia, aby ocenić, czy są to stany chwilowe dopuszczalne, czy już awaryjne. Mając na uwadze możliwości percepcyjne mechanika wachtowego, należy ujednoczyć sygnalizację alarmową w taki sposób, aby jednoznacznie informowała go o stanie częściowej niezdatności śruby nastawnej w formie jednego alarmu bez możliwości skojarzenia go z innymi podobnymi stanami silnika napędu głównego (unikanie mnogości sygnałów alarmowych) i stanami krytycznymi nienależącymi do zbioru (zbiór stanów) s_3 , dla których winien być zarezerwowany oddzielny alarm tak dźwiękowy jak i wizualny. Powinny znaleźć tu zastosowanie barwy żółte dla stanów niekrytycznych i jaskrawo czerwone dla stanów krytycznych z modulowanym dźwiękiem syreny maszynowej. Takie rozgraniczenie sygnalizacji ma istotne znaczenie, szczególnie w siłowniach okresowo bezwachtowych np. kl A16, ponieważ taka informacja jest wymagana w przypadkach szczególnie ciężkich eksploatacyjnie awarii. Od takiego rozgraniczenia zależy szybkość podjęcia decyzji i związanego z nią adekwatnego do sytuacji działania załogi maszynowej. Stany częściowej zdatności (s_2) jak i niezdatności (s_3), śruby nastawnej, zgodnie z przyjętą interpretacją wartości granicznych jej parametrów, winny być zapisane w bazie danych oraz prezentowane na monitorach zainstalowanych na stanowiskach manewrowych i oddalonych stanowiskach manewrowych (np. w CMK, na mostka). Prezentowany obraz na monitorze systemu kontroli i nadzoru pracy siłowni okrętowej, charakterystyczny dla alarmu, powinien być wpisany na listę alarmów i jednoznacznie wyselekcjonowany inną barwą tego rejestru z prezentacją aktualnej wartości sygnału na tle wartości granicznych tego przedziału

niesprawności, aż do czasu ustania sygnalizowanej niesprawności, czyli powinien być traktowany jako alarm aktywny. Natomiast przekroczenie wartości granicznych parametrów, zarezerwowanych jako strefa bezpieczeństwa, sygnalizujących zbliżający się stan niezdatności, powinien być sygnalizowany w formie jaskrawych pulsujących napisów z określeniem wartości przypisanych do stanu niezdatności. Model diagnostyczny, przeznaczony do celów eksploatacyjnych, którego celem jest zbudowanie systemu diagnozującego do wspierania podejmowania decyzji eksploatacyjnych, będzie spełniał swoje zadanie, jeśli uwzględnione w nim będą rzeczywiste warunki morskie, rejon pływania, pracy śruby nastawnej, niedoskonałość struktury konstrukcyjnej, zarówno śruby nastawnej jak i elementów elektroniki użytej do budowy systemu diagnostycznego. Model taki musi również uwzględniać różny stopień kompetencyjności załogi maszynowej i pokładowej. Istotnym jest także przyjęcie zakresu bezpieczeństwa w zakwalifikowaniu stanu *SN* do odpowiedniej klasy stanów na podstawie pomierzonej wartości kontrolowanego parametru diagnostycznego, z uwagi na możliwą krytyczną sytuację nawigacyjną, jaka może zaistnieć, w której bezpieczeństwo statku jest ważniejsze od bezpieczeństwa *SN*. Z rozważań wynika, że przy szerokiej dostępności do czujników pomiarowych (czujniki piezoelektryczne, tensometryczne, wibroakustyczne, indukcyjne it.) jednakowo ważnym jest wybór parametru monitorowanego, miejsce montażu czujników i interpretacja pomierzonych wartości. Po przetworzeniu przez system diagnozujący (elektroniczne układy wspomagające) pomierzonych wartości kontrolowanych parametrów pracy śruby nastawnej wyniki powinny być prezentowane jako jednoznaczny sygnał, charakteryzujący aktualny stan techniczny *SN* (np. wartość liczbowa parametrów, symbol, wyraz). Mając to na uwadze, możliwości zastosowania takiego modelu diagnostycznego, opisano w następnym rozdziale tej pracy.

Rozdział VIII

Możliwości zastosowania modelu diagnostycznego śruby nastawnej w praktyce eksploatacyjnej

8.1 Uwagi wstępne

Bezpieczeństwo ludzi, a także urządzeń przez nich eksploatowanych, jak śruby nastawne, jest celem nadrzędnym w działalności eksploatacyjnej. Aby cel ten zrealizować, trzeba zapewnić racjonalną eksploatację śruby nastawnej z uwzględnieniem jej niezawodności. Potrzeba taka wynika z tego, że śruba nastawna jest obiektem technicznym, wpływającym bezpośrednio na bezpieczeństwo załogi i statku, a pośrednio także na bezpieczeństwo ładunku, jako jeden z najistotniejszych elementów statku. W znacznym stopniu bezawaryjność śruby nastawnej (*SN*) jest zdeterminowana już podczas procesu projektowania, a dalej jest zależna od jakości procesu obsługi. Oba te procesy stanowią proces złożony i zależny od wielu czynników takich, jak :

- a. etap wstępny powstawania śruby o skoku nastawnym:
 - kwalifikacje projektantów *SN*,
 - kwalifikacje budowniczych *SN*,
 - jakość użytych materiałów do skonstruowania *SN*,
 - kwalifikacji i kompetencji jednostki nadzorującej projektowanie i budowę *SN*, (klasyfikator uznanego towarzystwa, dział kontroli jakości wytwórcy).
- b. etap montażu na jednostce pływającej i eksploatacji:
 - stan techniczny *SN*,
 - kwalifikacje i predyspozycje psychofizyczne osób dokonujących montażu i regulacji
nastaw *SN* na jednostce pływającej (regulacja wstępna i próby morskie),
 - kwalifikacje i predyspozycje psychofizyczne osób obsługujących *SN*,
 - jakość obsługi i użytych materiałów / części zastępczych,
 - warunki, w jakich *SN* jest użytkowana, które implikują zdarzenia niezależne od człowieka, losowe, będące zakłóceniami wpływającymi na stan techniczny tak złożonego obiektu technicznego, jakim jest śruba nastawna.

Każda niesprawność (uszkodzenie częściowe) układu napędowego ze śrubą o nastawnym skoku powoduje jego zdatność częściową, a po przekroczeniu wartości krytycznych parametrów struktury konstrukcyjnej *SN*, wynikających z założeń konstrukcyjnych i potrzeby użytkowych następuje uszkodzenie które, powoduje jego niezdatność (stany niezdatności opisane są w rozdziale V). Podczas eksploatacji w warunkach rzeczywistych stany takie zachodzą w chwilach losowych jako zdarzenia losowe. Stany te są często powodowane przez rozległe naruszenia konstrukcji oraz spójności materiału elementów śruby. Takie zdarzenia są zależne od:

- czasu, po upływie którego dokonywana jest identyfikacja zmiany stanu *SN*, zbyt długi ten czas prowadzi do rozległego uszkodzenia takiej śruby,
- trafności identyfikacji zmiany stanu *SN*,
- trafności decyzji jako skutek identyfikacji zmiany stanu *SN*,
- trafności i zasadność umiejscowienia w nadzorowanym układzie *SN* czujników i mierników pomiarowych, umożliwiających zidentyfikowanie aktualnego stanu technicznego *SN*.

W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych załoga statku, mając ograniczone możliwości wykonania obsługi serwisowych (konieczność wyłączenia z eksploatacji,

wynurzenie statku), może liczyć tylko na własne umiejętności oraz możliwości techniczne / warsztatowe. W tych warunkach istotnym staje się trafna i szybka ocena jej stanu technicznego, umożliwiającą określenie, czy zaistniał stan zdatności częściowej (s_2) taki, który może jeszcze zapewnić utrzymanie ruchu śruby, a więc także statku (z ograniczeniami wynikającymi ze stanu s_2), zapewniającego wymagany poziom bezpieczeństwa tego statku. Takim celom i zadaniom mają służyć systemy diagnostyczne (SD) przysposobione do potrzeb racjonalnego działania załóg, wynikającego z istniejącej struktury konstrukcyjnej SN . Systemy te są konieczne do racjonalnego sterowania procesem eksploatacji SN , które zapewniłoby w zadanym przedziale czasu wykonanie przez śrubę nastawną zadań. Warunkiem koniecznym takiego sterowania jest możliwość podejmowania trafnych decyzji przez załogę statku na każdym etapie eksploatacji danej śruby nastawnej.

8.2. Walory opracowanego modelu diagnostycznego śruby o skoku nastawnym

Systemy diagnozujące (SDG) przysposobione do sterowania procesem eksploatacji SN , nie są obecnie produkowane do zespołów napędowych statku, jako systemów diagnozowanych (SDN) [98, 99, 100, 101, 102, 103]. Nie można niestety w sposób bezpośredni, w praktyce eksploatacyjnej, zastosować tych samych SDG do określania stanu różnych typów śrub nastawnych. Każdy typ, dla którego nie ma właściwego systemu diagnozującego, powinien być najpierw poddany odpowiedniej identyfikacji i dopiero na podstawie uzyskanych wyników z badań można dobrać taki system diagnozujący, który spełnia wymogi bezpieczeństwa i eksploatacyjne. Inna możliwość zastosowania odpowiedniego SDG , to jego zaprojektowanie, wytworzenie i wdrożenie do eksploatacji.

Systemy diagnozujące śrub nastawnych, aktualnie produkowane przez różne firmy, są przysposobione jedynie do pomiaru wybranych parametrów pracy (ciśnienia oleju roboczego, jego temperaturę, wartości skoku osiągniętego przez śrubę nastawną). Systemy te różnią się przede wszystkim:

- koncepcją struktury funkcjonalnej,
- niezawodnością i trwałością,
- wiarygodnością (w tym trafnością) sformułowanych diagnoz,
- możliwością rozróżniania stanów zachodzących w czasie pracy,
- zakresem i poziomem diagnozowania.

Do wspomnianych systemów można zaliczyć takie systemy stałego nadzoru działania śruby nastawnej, jak: BAILLEY, NORIS, KIM MOLAND-Macon, ABB Zamech, NORCONTROL itd. [94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103].

Opracowany w tej pracy, przedstawiony i scharakteryzowany w rozdziałach nr. V, VI, VII model diagnostyczny, powstał w wyniku zastosowania naukowych metod analizy i oceny zdarzeń, zastosowano wnioskowanie dedukcyjne. W rozważaniach została przyjęta hipoteza, której treść została przedstawiona w rozdziale I:

„prognozowanie stanu procesu eksploatacji śrub nastawnych w chwili $t+\Delta t$, gdy znany jest tylko ich stan w chwili t , jest możliwe dlatego, ponieważ stan tych śrub w chwili $t+\Delta t$, i czas ich trwania zależy istotnie od stanu w chwili t a nie od stanów, które zaszły wcześniej i przedziałów czasu ich trwania”.

Została ona zweryfikowana w badaniach prowadzonych przeze mnie na statku będącym w rzeczywistej eksploatacji, tj. wykonywania zadań transportowych oraz obsług okresowych i głównych (5-cio letni remont stoczniowy). Weryfikacja polegała na identyfikowaniu stanu technicznego w oparciu o zarejestrowane wartości parametrów pracy śruby jako parametrów diagnostycznych takich jak ciśnienie i temperaturę oleju roboczego, czas wykonywania

zmiany skoku, dokładność osiągniętego zadanego skoku (pozycje wskazania mechanicznego sprzężenia zwrotnego), ciśnienie powietrza sterującego odpowiadające wyszczególnionym pozycjom skoku śruby, wskaźnik obciążenia silnika głównego, stan i zawadnienie oleju roboczego w obiegu, oceny słuchowej sygnału dźwiękowego oraz pomiar poziomu sygnału drganiowego generowanego przez śrubę (przy użyciu czujnika drgań). Przy podejmowaniu decyzji o przedłużeniu czasu jej użytkowania (czasu pracy) bazowałem tylko na tej informacji.

Wszystkie moje przewidywania potwierdziły, że w prognozowaniu stanu procesu eksploatacji śrub nastawnych wystarczy tylko znajomość jej aktualnego stanu i warunków zewnętrznych ruchu statku. Oznacza to, że można uznać hipotezę tę za prawdziwą.

Z przeprowadzonych przeze mnie badań w fazie eksploatacji tej śruby, oraz odnów głównych wynika, że potwierdzone zostały wywiedzione logiczne konsekwencje wynikające z tej hipotezy, a mianowicie nie stwierdzono uszkodzeń śruby w przedłużonym przeze mnie czasie jej użytkowania. W trakcie eksploatacji *SN* potwierdziły się konsekwencje wynikające z obserwacji stanów pracy *SN*, obsług okresowych i głównych, należy uznać hipotezę za prawdziwą.

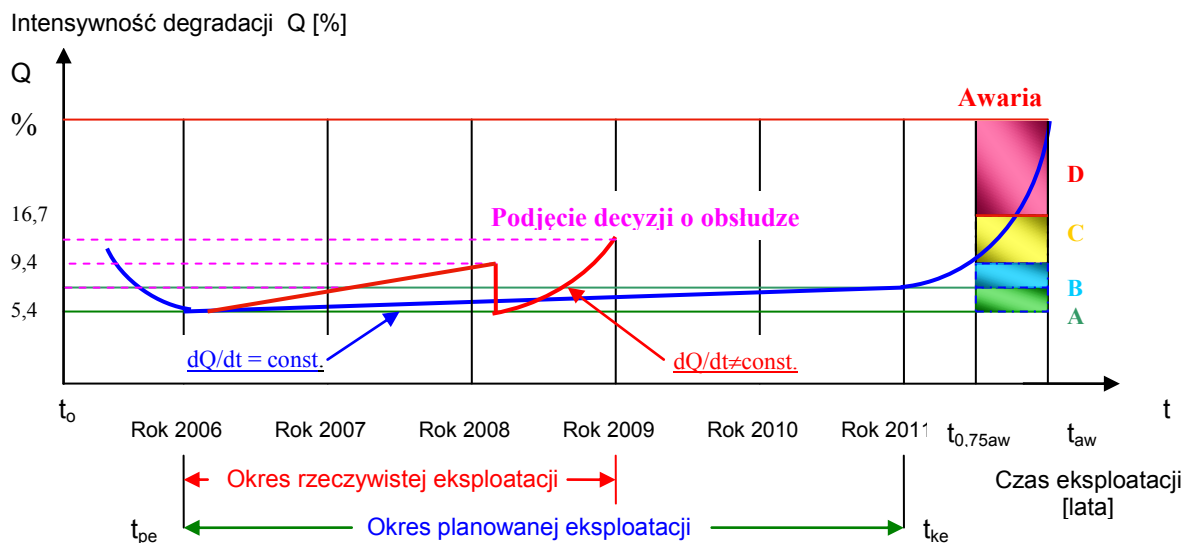
Tego rodzaju działania są one spotykane w praktyce eksploatacyjnej tych śrub, potwierdzone zarówno w czasie ruchu jak i odnów głównych. W trakcie eksploatacji *SN*, zaistniałe zdarzenia jak uszkodzenia jej urządzeń, opisane w załączniku nr. 2 potwierdziły słuszność przyjętej hipotezy.

Takie działanie eksploatacyjne użytkownika śrub nastawnych może ułatwić opracowanie probabilistycznego modelu diagnostycznego tej śruby. Słuszność tego stwierdzenia można uzasadnić przez udowodnienie tezy przyjętej w pracy i sformułowanej w podrozdziale 1.4. pt. „Teza pracy”.

Do udowodnienia tej tezy przyjęto założenie: „nieznany, domniemany stan techniczny śruby nastawnej można określić tylko w przybliżeniu przez jednoznaczne oszacowanie prawdopodobieństwa jej zużycia”. Zostało ono podane w tym samym podrozdziale, co teza pracy.

Założenie to zostało oparte na doświadczeniach eksploatacyjnych moich i współpracowników, że zmiany stanu technicznego będące powodem pojawiania się uszkodzeń częściowych (pojawienie się stanów zdatności częściowych) jak też pełnych (pojawienie się stanów niezdatności) jest zdarzeniem losowym, a więc zdarzeniem niemożliwym do przewidzenia w dowolnie wybranej chwili czasu eksploatacji. Wobec tego do opisu procesu zmian stanów technicznych śruby nastawnej musi być zastosowany rachunek prawdopodobieństw i statystyka matematyczna, która umożliwia estymacje punktową bądź przedziałową tego prawdopodobieństwa na podstawie badań eksploatacyjnych śrub napędowych podobnych (najlepiej tego samego typu).

Przykładem słuszności tego założenia może być zdarzenie polegające na krytycznym zawadnieniu oleju roboczego, które spowodowało niestabilną pracę śruby, a ponadto korozyjne zużycie elementów hydrauliki wykonawczej, co zostało potwierdzone w trakcie odnów tego układu. Ponadto w trakcie badań śruby nastawnej, jej układu sterowania, wpływu ubytków kawitacyjnych skrzydeł *SN* na obciążenie układu napędowego, jak i inne zużycia jej podzespołów wykazało, że nie ma korelacji między zużyciem a planowanym okresem eksploatacji, że zależne jest od wielu czynników, a zatem kryterium czasu eksploatacji *SN*, nie zawsze jest dobrym kryterium do planowania terminów obsług głównych. Na podstawie prowadzonych badań i analizy wyników sporządzono wykres przedstawiający zależność intensywności zużycia od czasu eksploatacji, pokazany na rys. nr. 8.5.



Rys. 8.1 Diagram intensywności degradacji układu zadawania skoku SN w funkcja czasu jego eksploatacji : A - stan poprawnej pracy; B - stan akceptowalnej pracy; C - stan podjęcia decyzji eksploatacyjnej, (przekroczenie 75% do stanu awaryjnego, może zaistnieć kontrolowane wyłączenie mechanizmu z pracy, wymagany doгляд), D – stan niedopuszczalny, t_0 – czas początku życia urządzenia, t_{pe} – czas początku eksploatacji, t_{ke} – czas końca eksploatacji, t_{aw} – czas osiągnięcia stanu awaryjnego, $t_{0,75aw}$ – czas przekroczenia 75% czasu do awarii.

Do udowodnienia tej tezy zostało zastosowane wnioskowanie dedukcyjne nazywane regułą odrywania [Pabis], w którym rozpatrzono trzy zdania:

1. Założenie, o treści: **nieznany, domniemany stan techniczny śruby nastawnej można określić tylko w przybliżeniu przez jednoznaczne oszacowanie prawdopodobieństwa jej zużycia** – zdanie α (założenie)
2. Zdanie wnioskującego (należące do wiedzy osoby przeprowadzającej wnioskowanie): **bardziej racjonalne sterowanie procesem eksploatacji śruby nastawnej, którego zmiany stanu technicznego są zdarzeniami losowymi, umożliwiają probabilistyczne a nie deterministyczne modele diagnostyczne śrub nastawnych** = zdanie β (zdanie prawdziwe)
3. Teza: **zastosowanie probabilistycznego modelu diagnostycznego śruby nastawnej umożliwi bardziej racjonalne sterowanie procesem eksploatacji tego rodzaju pędników** – zdanie χ (teza)

W tym przypadku można przyjąć następujące założenia [64]:

1. $\alpha \Rightarrow \beta$
2. $\beta \Rightarrow \chi$
3. α

Formalny przebieg dowodu, który ma wykazać prawdziwość tezy jest następujący:

$$\begin{aligned} \alpha &\Rightarrow \beta \\ \beta &\Rightarrow \chi \\ \alpha &\Rightarrow \chi \end{aligned}$$

Założeniem jest zdanie p a tezą zdanie r , które trzeba dowieść:
Sposób przeprowadzenia dowodu:

- 1) $\alpha \Rightarrow \beta$ – prawdziwa implikacja syntaktyczna,
- 2) $\beta \Rightarrow \chi$ – prawdziwa implikacja syntaktyczna,

- 3) α – założenie,
- 4) β – zdanie prawdziwe na podstawie implikacji 1 oraz 3, gdyż α – założenie,
- 5) χ – teza prawdziwa na podstawie 2 i 4.

Słowne interpretacje elementów dowodu tezy przedstawionego wyżej w ujęci formalnym są następujące:

1. $\alpha \Rightarrow \beta$. Jeżeli *nieznany, domniemany stan techniczny śruby nastawnej można określić tylko w przybliżeniu przez jednoznaczne oszacowanie prawdopodobieństwa jej zużycia, to bardziej racjonalne sterowanie procesem eksploatacji śruby nastawnej, którego zmiany stanu technicznego są zdarzeniami losowymi, umożliwiają probabilistyczne a nie deterministyczne modele diagnostyczne śrub nastawnych.*
2. $\beta \Rightarrow \chi$. Jeżeli *bardziej racjonalne sterowanie procesem eksploatacji śruby nastawnej, którego zmiany stanu technicznego są zdarzeniami losowymi, umożliwiają probabilistyczne a nie deterministyczne modele diagnostyczne śrub nastawnych, to zastosowanie probabilistycznego modelu diagnostycznego śruby nastawnej umożliwi bardziej racjonalne sterowanie procesem eksploatacji tego rodzaju pędników.*
3. α (założenie). *Nieznany, domniemany stan techniczny śruby nastawnej można określić tylko w przybliżeniu przez jednoznaczne oszacowanie prawdopodobieństwa jej zużycia.*
4. β (zdanie prawdziwe). Ze względu na prawdziwość implikacji syntaktycznych 1 oraz 3, prawdziwe jest zdanie: *bardziej racjonalne sterowanie procesem eksploatacji śruby nastawnej, którego zmiany stanu technicznego są zdarzeniami losowymi, umożliwiają probabilistyczne a nie deterministyczne modele diagnostyczne śrub nastawnych.*
5. χ (teza). Na podstawie prawdziwych implikacji syntaktycznych 2 i 4 prawdziwa jest teza: *zastosowanie probabilistycznego modelu diagnostycznego śruby nastawnej umożliwi bardziej racjonalne sterowanie procesem eksploatacji tego rodzaju pędników*

Z praktyki zawodowej także wynika, że przedstawiona teza jest prawdziwa, co jest oczywiste ponieważ stanowi logiczną konsekwencję założenia przyjętego w pracy.

Tak więc prawdziwość tezy w zestawieniu z przyjętym założeniem, które zostało przyjęte jako prawdziwe, została potwierdzona zarówno drogą logiczną jak też empirycznie, w fazie użytkowania i obsługiwaną SN. Probabilistyczny model diagnostyczny służyć będzie do wspierania operatora w eksploatacji śrub nastawnych, ale aby spełniał wymogi użyteczności, opracowane na jego podstawie systemy diagnozujące muszą być niezawodne.

Znajomość niezawodności i trwałości systemów diagnozujących jest niezbędna ze względu na potrzebę określenia wiarygodności diagnozy, która jest konieczna do zapewnienia racjonalnego użytkowania śruby nastawnej. Wynika to z tego, że formułowanie diagnozy odbywa się przy założeniu, że system diagnozujący (SDG) znajduje się w stanie pełnej zdatności (s_1). Im niezawodność i trwałość tego systemu są mniejsze, tym mniejsze jest prawdopodobieństwo, że w dowolnej chwili system diagnozujący będzie znajdował się w stanie pełnej zdatności. Oznacza to, że im mniejsza jest niezawodność SDG, tym większe jest wtedy prawdopodobieństwo sformułowania błędnej diagnozy. Ponadto wiarygodność jej obniżają:

- zakłócenia istniejące w czasie pomiaru wartości parametrów diagnostycznych przez urządzenia diagnozujące (UD) SDG, które wynikają głównie ze sposobu pracy śruby nastawnej i własności torów pomiarowych,

- nieodpowiednie przysposobienie *SN* jako systemów diagnozowanych do systemów diagnozujących,
- zastosowanie *SDG*, które nie są przysposobione do rozpoznawania wszystkich istotnych stanów *SDN* jakie mogą zaistnieć w czasie pracy,
- niskie kwalifikacje użytkowników systemów diagnostycznych (*SD*), czyli użytkowników *SDN* i *SDG*, a ponadto adresatów, czyli przedstawicieli armatora, dla których przeznaczone są wyniki diagnozowania.

Dobór odpowiedniego systemu diagnozującego (*SDG*) do określonego typu śruby nastawnej wymaga przeanalizowania przynajmniej tych cech, które zostały wymienione. Przydatność eksploatacyjna *SDG*, produkowanych przez różne firmy dla określonych typów śrub nastawnych, jest bezsporna wtedy, gdy:

- umożliwiają rozpoznawanie wszystkich istotnych stanów, jakie mogą zajść w czasie ich pracy,
- są przysposobione do wszystkich form diagnostycznego działania, czyli do diagnozowania, dozorowania, prognozowania i genezowania, bez których nie ma możliwości prowadzenia racjonalnego nadzorowania przebiegów procesów zachodzących w śrubie, sterowania nimi i ich usprawniania,
- wiarygodności diagnoz, prognoz oraz genez są nie mniejsze od wymaganych przez użytkownika,
- mają odpowiednią niezawodność i trwałość, a zatem cechy, które w czasie pracy śruby wpływają zasadniczo na wymienione wiarygodności,
- zakupienie i wdrożenie *SDG* może przyczynić się do obniżenia kosztów eksploatacji oraz uzyskania innych korzyści, w możliwym do przyjęcia czasie.

Wymienione cechy *SDG* powinny być także brane pod uwagę przy projektowaniu systemów diagnozujących.

Dobór odpowiedniego systemu diagnozującego do określonego rodzaju śrub nastawnych wymaga przeanalizowania przynajmniej tych ich walorów, o których już wspomniano. Obecnie dostępne są dane o własnościach *SDG* produkowanych przez różne firmy które są zastosowane na różnych statkach. Dane te umożliwiają zorientowanie się użytkowników tych śrub, w jakim zakresie można diagnozować *SN*, jakie parametry diagnostyczne można i trzeba mierzyć, gdzie i jaką aparaturą pomiarową, jak często należy rejestrować wartości tych parametrów oraz jakie formy diagnostycznego działania są możliwe do zrealizowania i jak funkcjonuje (jeśli jest przewidziany w systemie) program lokalizowania przyczyn stwierdzonego stanu technicznego systemu diagnozującego. Wśród najbardziej znanych systemów diagnozujących okrętowych śrub nastawnych największe możliwości diagnostyczne ma system NORIS, który posiada ciągły monitoring wartości wyszczególnionych parametrów pracy, sygnalizację czasu rzeczywistego zaistnienia zakłócenia w pracy układu śruby nastawnej, jednoznaczną prezentację miejsca pomierzonej wartości parametru diagnostycznego, oraz prezentację stanu aktualnego obciążenia śruby nastawnej, która jest złożonym, jak wiadomo, urządzeniem składającym się z układów: *MOSS*, *MZSS*, *NSN*, piasty i ruchomych skrzydeł [15, 17, 22, 34, 49, 63, 75, 78].

Istotnym jest, w budowaniu systemów diagnostycznych (*SD*), które tworzą systemy diagnozujące (*SDG*), przysposobione do badań diagnostycznych śrub nastawnych (*SN*) oraz *SN* jako systemy diagnozowane (*SDN*), aby spełniały one wymagania przydatne w racjonalnej eksploatacji śrub nastawnych. Oznacza to, że powinny w najkrótszym czasie, jaki jest możliwy do osiągnięcia, wygenerować wiarygodne diagnozy umożliwiające mechanikowi podjęcie trafnej decyzji eksploatacyjnej. Jednakże należy brać pod uwagę, że decyzje eksploatacyjne podejmowane są w realnych warunkach eksploatacyjnych z określonym stopniem ryzyka nietrafności, co oznacza, że decyzje mogą być błędne, pomimo poprawnego sformułowania diagnoz. Podejmowanie więc racjonalnych decyzji w rzeczywistych

warunkach eksploatacyjnych jest możliwe przy zastosowaniu rachunku optymalizacyjnego [19, 26, 30, 58, 63, 64]. Tak więc eksploatacja podejmując decyzje eksploatacyjne, musi działać wieloaspektowo tzn. musi uwzględnić bezpieczeństwo ruchu statku, efektywność eksploatacyjną, ochronę środowiska. Wynika z tego, że potrzebny jest model diagnozujący, który umożliwi podejmowanie decyzji przy minimalnym ryzyku podjęcia błędnej decyzji eksploatacyjnej. Matematyczny model, opisujący taką sytuację decyzyjną, został już opisany w publikacjach [27, 35, 58, 63, 64]. Opracowany został on przy wykorzystaniu statystycznej teorii decyzji, która umożliwia dokonanie analizy sytuacji eksploatacyjnej i podjęcia decyzji (spośród możliwych do podjęcia) z uwzględnieniem oczekiwanej konsekwencji, którą może być największa oczekiwana korzyść, interpretowana jako minimalne oczekiwane starty (koszty) lub maksymalne dochody. Zastosowanie tej teorii wymaga jednak oszacowania prawdopodobieństwa, że domniemane stany śruby nastawnej należą do wyróżnionych klas stanów, co zostało już opisane w rozdziale V i VII tej pracy, oraz prawdopodobieństwa postawienia przed użytkownikiem śruby nastawnej określonych zadań. Problem decyzyjny polega na rozstrzygnięciu, którą decyzję spośród decyzji (d_1, d_2, d_3) podjąć, jeśli mogą zaistnieć stany $s_1, s_2, i s_3$ śruby nastawnej (SN), a śruba jest przysposobiona do wykonania zadań z_{dk} ($k = 1, 2, \dots, K$). Problem ten, jako przykład, można przedstawić w formie dendrytu, który ujmuje:

- rodzaje decyzji (d) należące do zbioru (D) decyzji możliwych do podjęcia w danej sytuacji,
- wyróżnione klasy stanów technicznych (s),
- konsekwencje $c(d, s, z)$ wynikające z podjęcia poszczególnych decyzji (d) o realizacji zadań (z) przy stanie urządzeń należących do klasy (s) oraz wykonania tych decyzji.
- możliwe do podjęcia zadania (z), należące do zbioru zadań (Z), które mogą być zlecone,

Otóż w eksploatacji aktywnej życia SN , mogą zaistnieć sytuacje takie jak: normalna (s_1^*), awaryjna (s_2^*), katastroficzna (s_3^*), gdzie sytuacje s_j^* ($j=1, 2, 3$) są podzbiorem zbioru S^* . Takie sytuacje tworzą zbiór

$$S^* = \{s_1^*, s_2^*, s_3^*\} \quad (8.1)$$

którego elementy można interpretować następująco [38]: (Koncepcja podejmowania decyzji)

- sytuacja normalna
- sytuacja awaryjna
- sytuacja katastroficzna

Czy zaistnieje którakolwiek z wyżej wymienionych sytuacji zależy istotnie od stanu technicznego SN , a ściślej od stanu technicznego jej podsystemów mające zasadnicze znaczenia dla bezpieczeństwa statku. A więc w tym przypadku znaczenie ma zbiór stanów technicznych śruby nastawnej.

$$S = \{s_1, s_2, s_3\} \quad (8.2)$$

o interpretacji [41]

- s_1 – stan zdadności
- s_2 – stan zdadności częściowej
- s_3 – stan niezdadności

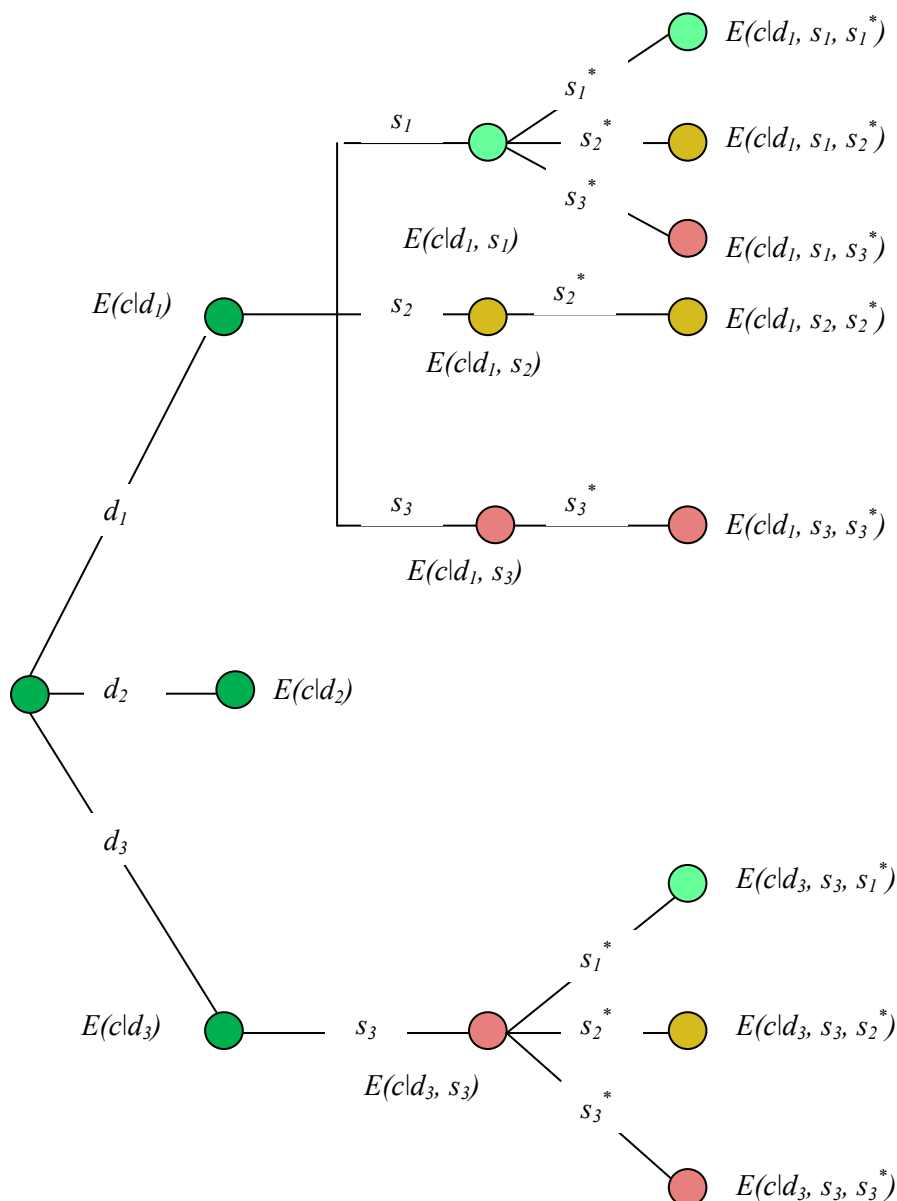
Działanie SN w początkowej fazie zazwyczaj realizowane jest w sytuacji normalnej, którą określonej czynnikami:

- stan pełnej zdadności SN (s_1)
- wymagane odpowiednie predyspozycje psychofizyczne i wiedza załogi
- sprzyjające warunki hydrometeorologiczne, w których działa SN
- prawidłowo wykonane obsługi SN przed rozpoczęciem podróży morskiej

W przypadku pogorszenia się stanu technicznego SN , czyli przejście stanu s_1 do s_2 i dalej do s_3 z jednoczesnym pogorszeniem się warunków działania SN (predyspozycje załogi, zła obsługa bieżąca, warunki hydrometeorologiczne) mogą pojawić się kolejno sytuacje s_1^* , s_2^* , s_3^* . W tych sytuacjach posiadając informacje o stanie technicznym SN , warunkach hydrometeorologicznych, predyspozycji załogi, jakości wykonywanych obsług bieżących stosując statystyczną teorię decyzji, można podjąć racjonalną decyzję z możliwych:

- decyzja d_1 – rozpocząć wykonywanie zadania z ,
- decyzja d_2 – wykonać najpierw obsługę profilaktyczną, w celu odnowy tych ich własności, które są konieczne do wykonania zadania z , a następnie przystąpić do realizacji tego zadania,
- decyzja d_3 – nie wykonywać zadania z , do chwili usunięcia, ustania przyczyn zagrażających bezpieczeństwu statku.

Dendryt taki dla przykładowej sytuacji decyzyjnej dotyczącej wykonania danego zadania przedstawiony został na rys. 8.1 [28, 30, 58, 64]

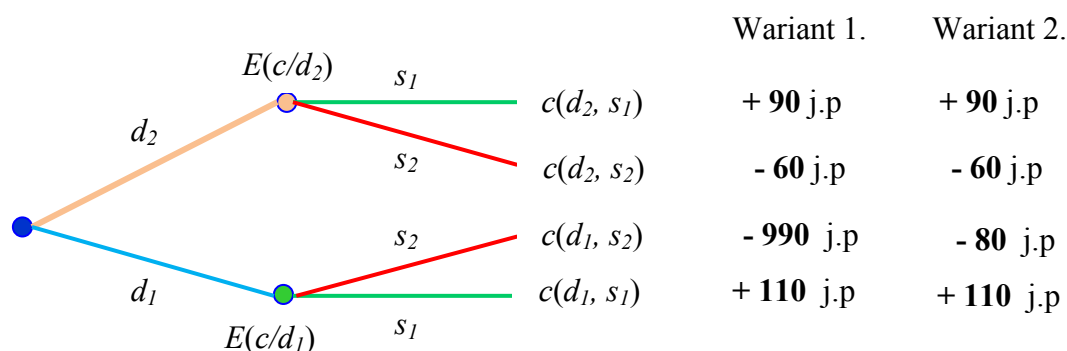


Rys. 8.2 Przykładowy dendryt decyzji eksploatacyjnych $d_k(k=1, 2, 3)$ z uwzględnieniem stanów $s_i(i=1, 2, 3)$, sytuacji $s_j^*(j=1, 2, 3)$ i konsekwencji $c(d_k, s_i, s_j^*)$

Z przedstawionej sytuacji decyzyjnej wynika, że równie trudne a nawet trudniejsze może być oszacowanie konsekwencji decyzji $c(d_k, s_i, s_j^*)$ a nie prawdopodobieństwa $p(s_i)$ oznaczającego, że śruba nastawna jest w stanie technicznym s_i , przy czym $k=1,2,3$ (rys. 8.1). Można dążyć do dokładnego oszacowania prawdopodobieństwa $p(s_i)$ albo też poprzestać na mniej dokładnym oszacowaniu prawdopodobieństwa, które może być miarą [30, 58]:

- trafności decyzji, jeśli *SDG* podczas badania diagnostycznego śruby nastawnej (*SN*) i wnioskowania diagnostycznego, był w stanie pełnej zdatności i z tego powodu działał niezawodnie, czyli niezawodność *SDG* była wtedy równa jedności.
- Wiarygodność diagnozy, jeśli *SDG* podczas badania diagnostycznego śruby nastawnej (*SN*) i wnioskowania diagnostycznego mógł być w stanie pełnej zdatności bądź w stanie zdatności częściowej i dlatego nie ma pewności, że działał niezawodnie, czyli niezawodność *SDG* była mniejsza od jedności

Można wykazać, że dla potrzeb podejmowania decyzji eksploatacyjnych, zbudowanie dendrytu decyzyjnego przedstawionego na rys. 8.1 jest konieczne. Dla uproszczenia rozważań w tym względzie wspomniany dendryt zostanie uproszczony do wersji przedstawionej na rys. 8.2 [33].



Rys. 8.3 Uproszczony dendryt decyzji eksploatacyjnych [30].

W dendrycie tym uwzględniono decyzje:

- d_1 – nie wykonywać obsługi śruby o skoku nastawnym i wykonać zadanie Z,
 - d_2 – wykonać obsługę śruby o skoku nastawnym a następnie zadanie Z,
- przy czym w ujęciu formalnym zadanie Z może być określone następująco [29]:

$$Z = \langle \Phi, W, t \rangle \quad (8,3)$$

Gdzie: Φ – poprawne funkcjonowanie *SN* (czyli podzespołów *SN*); W – warunki, w których podzespoły *SN* powinny poprawnie działać (pracować); t – czas wykonywania zadania Z.

Przydatność przedstawionej propozycji podejmowania decyzji z zastosowaniem dendrytu decyzyjnego przedstawionego na rys. 8.2 można udowodnić na przykładzie wziętym z mojej praktyki eksploatacyjnej, który został przedstawiony niżej.

W praktyce eksploatacyjnej istnieją takie warunki morskie, które umożliwiają wykonanie podjętego zadania Z, jeżeli śruba nastawna (*SN*) będzie się znajdowała w stanie pełnej zdatności (s_1) przez czas t realizacji tego zadania. Wykonanie tego zadania sprawia, że statek zarobić może 100 j.p. (jednostek pieniężnych). Natomiast w przypadku, gdy *SN* będzie w stanie zdatności częściowej (s_2) może być zadanie to nie tylko niewykonane, ale może także dojść do katastrofy polegającej nawet na zatonięciu statku wraz z całą załogą. Związane a tym

starty mogą sięgać 1000 j.p. Aby do tego nie doszło należy wykonać obsługę profilaktyczną, co wymaga podjęcia decyzji d_2 – czyli wykonać obsługę śruby nastawnej a następnie zadanie Z. Jednak wykonanie takiej obsługi wymaga poniesienia kosztów $k_0 = 10 \text{ j.p.}$. Nie jest ona potrzebna jeżeli SN byłaby w stanie s_1 , lecz pewność, że jest w takim stanie (wyrażona prawdopodobieństwem) wynosi $p = 0,95$. Zatem jeśli zostanie podjęta decyzja d_1 , a SN znajduje się w stanie s_1 , to statek po wykonaniu zadania zarobi 100 j.p., i zostanie mu $k_0 = 10 \text{ j.p.}$ nie wydanych na wykonanie obsługi profilaktycznej, czyli konsekwencja podjęcia tej decyzji $c(d_1, s_1) = 110 \text{ j.p.}$. Jeżeli jednak okaże się, że SN była w stanie s_2 , to statek zatonie i powstaną straty równe $k_k = -1000 \text{ j.p.}$, ale zostało $k_0 = 10 \text{ j.p.}$ nie wydanych na obsługę, co oznacza konsekwencję $c(d_1, s_2) = -990 \text{ j.p.}$. Natomiast w przypadku podjęcia decyzji d_2 – czyli wykonać obsługę śruby nastawnej a następnie zadanie Z, zostanie wykonana obsługa profilaktyczna, której koszt jest równy $k_0 = 10 \text{ j.p.}$. Jeżeli SN będzie w stanie s_1 , to konsekwencja $c(d_2, s_1) = 90 \text{ j.p.}$, ponieważ od uzyskanego dochodu 100 j.p. należy odjąć koszt wykonania obsługi profilaktycznej $k = 10 \text{ j.p.}$. Natomiast jeśli SN będzie w stanie s_2 , to wskutek wcześniejszej odnowy statek nie zatonie, ale nie wykona zadania i poniesie karę $k_r = -50 \text{ j.p.}$. Zatem koszt kary (k_r) razem z kosztami obsługi $k_0 = -10 \text{ j.p.}$ doprowadzi do konsekwencji $c(d_2, s_2) = -60 \text{ j.p.}$

Aby w takiej sytuacji podjąć decyzję należy wyznaczyć wartości oczekiwane konsekwencji $E(c/d_1)$ oraz $E(c/d_2)$ i po ich porównaniu podjąć decyzję, której wartość oczekiwana jest większa.

W rozpatrywanym przypadku (Wariant 1)

$$\begin{aligned} E(c/d_1) &= p(s_1)c(d_1, s_1) + p(s_2)c(d_1, s_2) = +55,0 \text{ j.p.} \\ E(c/d_2) &= p(s_1)c(d_2, s_1) + p(s_2)c(d_2, s_2) = +82,2 \text{ j.p.} \end{aligned}$$

Z uwagi na to, że $E(c/d_2) > E(c/d_1)$, więc zgodnie z bayerowską regułą podejmowania decyzji należy podjąć decyzję d_2 , czyli decyzję: wykonać obsługę profilaktyczną śruby nastawnej a następnie wykonać zadanie Z.

Wariant powyższy (Wariant 1) rozważań dotyczył przypadku, gdy spodziewana jest (jest brana pod uwagę) katastrofa polegająca na zatonięciu statku, Można tu rozpatrywać także możliwość drugą (Wariant 2), który nie przewiduje katastrofy, lecz jedynie straty wynikające z niewykonania zadania ($k_r = -50 \text{ j.p.}$) oraz konieczność poniesienia znacznych kosztów związanych z rozległym uszkodzeniem śruby nastawnej wskutek nie wykonania obsługi wcześniej wymaganej ($k_w = 80 \text{ j.p.}$)

W tym przypadku (Wariant 2)

$$\begin{aligned} E(c/d_1) &= p(s_1)c(d_1, s_1) + p(s_2)c(d_1, s_2) = +100,5 \text{ j.p.} \\ E(c/d_2) &= p(s_1)c(d_2, s_1) + p(s_2)c(d_2, s_2) = +82,2 \text{ j.p.} \end{aligned}$$

Z uwagi na to, że $E(c/d_1) > E(c/d_2)$, więc zgodnie z bayesowską regułą podejmowania decyzji należy podjąć decyzję d_1 , czyli decyzję: nie wykonywać obsługi profilaktycznej śruby nastawnej, lecz przystąpić do wykonania zadania Z.

Przy okazji tych rozważań zostanie wykazana także dokładności oszacowania prawdopodobieństwa p poprawnej pracy śruby nastawnej. Przy tak prostej sytuacji decyzyjnej, jaką odzwierciedla dendryt decyzyjny przedstawiony na ryz. 8.2., najłatwiej można określić decyzję, którą należy podjąć, wyznaczając prawdopodobieństwo p^* , czyli takie, przy którym ze względów formalnych jest obojętne, która z możliwych decyzji zostanie podjęta, d_1 czy d_2 . Przy tym prawdopodobieństwo (p^*) uzyskuje następujące zależności [24].

$$p^* \rightarrow (c/d_1) = E(c/d_2) \rightarrow d_1 \cup d_2 \quad (8.4)$$

przy czym $p = p\{s_1\}$,
czyli

$$p^*c(d_2, s_1) + (1 - p^*)c(d_2, s_2) = p^*c(d_1, s_2) + (1 - p^*)c(d_1, s_1) \quad (8.5)$$

Po odpowiednich przekształceniach można uzyskać wzór:

$$p^* = \frac{c(d_1, s_2) - c(d_2, s_2)}{c(d_2, s_1) + c(d_1, s_2) - c(d_2, s_2) - c(d_1, s_1)} \quad (8.6)$$

Rozumowanie decydena (osoby podejmującej decyzję) jest następujące:

$$p = p(A) = 1 \rightarrow d_2 \quad \text{zaś} \quad p = p(A) = 0 \rightarrow d_1$$

i taka sama zasada podejmowania decyzji, a mianowicie:

$$p > p^* \rightarrow d_1, \text{ bo wtedy } E(c/d_1) > E(c/d_2)$$

$$p < p^* \rightarrow d_2, \text{ bo wtedy } E(c/d_1) < E(c/d_2)$$

W publikacji [58] wykazano, że w statystycznej teorii decyzji wartość oczekiwana konsekwencji (korzyści lub strat) jest logicznym kryterium wyboru najkorzystniejszej decyzji. Dla wariantu 1, który został zobrazowany za pomocą grafu widocznym na rys. 8.2. wspomniane prawdopodobieństwo $p_1^* = 0,98$, natomiast dla wariantu 2, $p_2^* = 0,4$. W opisanym modelu logika podejmowania decyzji jest następująca, jeżeli wartość oczekiwana konsekwencji jako korzyści $E(c/d_1)$ jest większa od wartości oczekiwanej jako korzyść $E(c/d_2)$, to należy podjąć decyzję d_1 i odwrotnie. Ta reguła postępowania dotyczy także konsekwencji, którymi są starty, pod warunkiem, że są one podane w wartościach ujemnych. W przypadku, gdy rozpatrywane są tylko straty określone jako wartości dodatnie, wtedy należy podjąć taką decyzję, której odpowiada mniejsza wartość oczekiwana start [30].

Zatem uwzględniając dendryt przedstawiony na rys. 8.2 i korzystając z wzoru (8.4), można stwierdzić, że $p^* = 0,4$. Wobec tego, zgodnie z przyjętym kryterium decyzyjnym, zostanie podjęta decyzja d_1 , czyli decyzja, że „nie należy wykonywać obsługi śruby, lecz podjąć wykonanie zadania”. Decyzja taka zostanie zawsze podjęta, jeśli p będzie większe od p^* ($p > p^*$). Oczywiście jest, że wraz ze wzrostem zużycia śruby nastawnej, będzie malało prawdopodobieństwo p i gdy osiągnie wartość $p < 0,4$, zostanie podjęta decyzja d_2 .

Tak jak każde urządzenie techniczne, tak i śruba nastawna podlega naturalnemu zużyciu. W czasie jej użytkowania, nawet przy prawidłowo podejmowanych decyzjach eksploatacyjnych, często ulega ona awarii wskutek istnienia nieprzewidywalnych destrukcyjnych czynników zewnętrznych, niezależnych od człowieka. Proces odnowy konieczny aby usunąć, skutek naturalnego zużycia SN , wymaga całkowitego lub częściowego demontażu SN , a to powoduje jej wyłączenie z użytkowania. Niekiedy jednak istnieje możliwość jej dalszego użytkowania (zależnie od stanu jej podzespołu lub stopnia demontażu niektórych części podzespołów SN). Wynika z tego, że jako logiczna konsekwencja, może być przyjęty następujący podział części i podzespołów według takich kryteriów:

- dostępność do przywrócenia potencjału eksploatacyjnego śruby nastawnej,
 - a. możliwość demontażu i montażu podczas ruchu śruby bądź statku,
 - b. możliwość demontażu i montażu podczas postoju statku (w porcie, w morzu),
 - c. konieczność dokowania statku.
- możliwości pomiarowe urządzeń diagnozujących w celu określenia stanu wspomnianych części lub podzespołów poprzez,

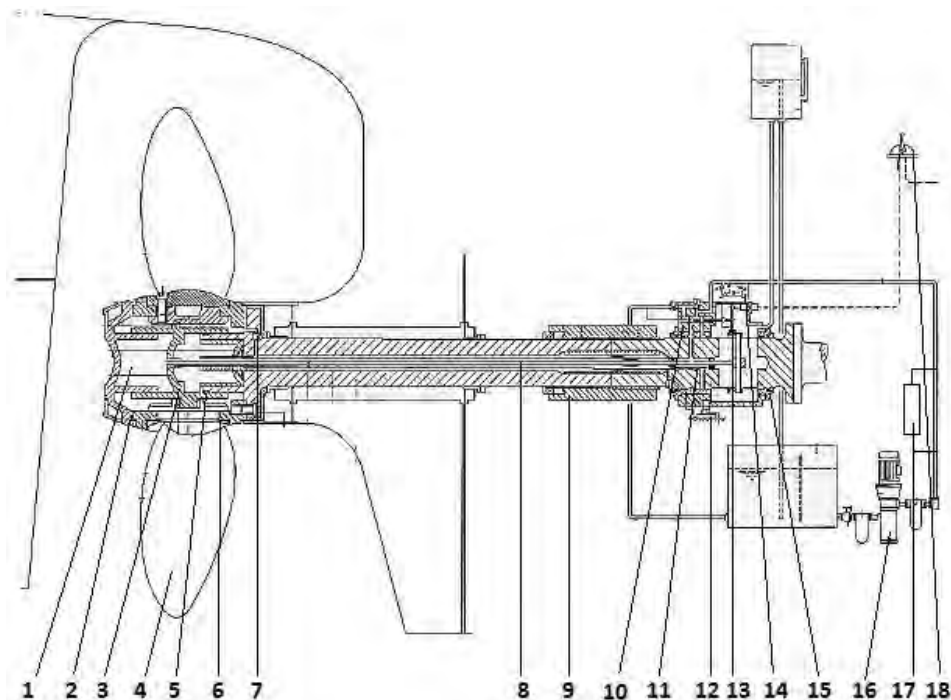
- a. pomiar bezpośredni,
- b. pomiar pośredni.

- wpływ skutków uszkodzonej części na przebieg procesów eksploatacji śruby nastawnej,
- szybkość zachodzącej degradacji w skutek zużycia prowadzącego do uszkodzenia danej części,
- możliwość zapobieżenia uszkodzeniu danej części poprzez dokładne stosowanie zaleceń producenta w czasie działań eksploatacyjnych,
- możliwość spowolnienia przebiegu procesu degradacji struktury konstrukcyjnej śruby poprzez zmianę warunków jej pracy, lub częściowe odświeżenie mediów roboczych.

Zastosowanie powyższych kryteriów, w podziale części/podzespołów śruby nastawnej, daje możliwość określenia zakresu prac możliwych do wykonania przez załogę statku, oraz wytypowanie tych prac, do których wymagana jest potrzebna załoga serwisowa lub stoczniowa, jeśli konieczne jest dokowanie statku. Należy tu również pamiętać o hierarchizacji uszkodzeń pod kątem ich wpływu bezpośredniego jak i pośredniego na konsekwencje eksploatacyjne wynikające z uszkodzenia śruby nastawnej. Konsekwencje, mające miejsce w eksploatacji śruby nastawnej, w wyniku jej uszkodzenia np. nadmierne uszkodzenia uszczelnienia płata śruby bądź suwaka zaworu rozrządu oleju mechanizmu zmiany skoku śruby (MZSS) są zasadniczo odmienne. Wobec tego musi być inny sposób prowadzenia prac powodujących odnowę tych mechanizmów. W tym aspekcie logiczne jest przyjęcie podziału podzespołów śruby nastawnej na grupy dostępności:

- A – podzespoły wielkogabarytowe (rys. 8.3); do ich odnowy wymagany jest tu całkowity demontaż każdego takiego podzespołu i w tym podzespoły jego elementów jako części śruby nastawnej. Niezbędne przy tym dokowanie, usunięcie mediów roboczych, stwarzają trudności technologiczne i w związku z tym podwyższają koszty eksploatacyjne wykonywanych prac koniecznych do zrealizowania w ramach obsługi przywracających potencjał użytkowy. Wykonanie jednak tych prac jest konieczne, ponieważ, uszkodzenie tych części może doprowadzić do utraty napędu przez statek i jego katastrofy. Do tego rodzaju części śruby nastawnej jak pokazano na rys.8.3 należą takie: jak piasta (1) z jej elementami składowymi (2, 3, 5, 6, 7), ponadto płat *SN* (4), sprzęgło (*SKF*-tulejowe sprzęgło skurczliwe) (9), zespół teleskopowych rur olejowych, mechanizm zadawania skoku (10, 11, 13).
- B – podzespoły (rys. 8.3) wymagające częściowego ich demontażu i odłączenia ich elementów jako części śruby nastawnej, które mogą być poddane obsłudze podczas eksploatacji statku na morzu, ale wymagają jednak zatrzymania statku na określony czas (niezbędny do zrealizowania wymaganego zakresu obsługi). Do takich podzespołów należy np. blok zaworowy rozrządu oleju (10), przetwornik pneumatyczno-hydrauliczny sygnału zadawania skoku *SN* (14), blokada przed obrotem skrzyni zlewowej oleju (12),
- C – podzespoły dostępne do obsługi podczas pracy śruby nastawnej, charakteryzujące się małymi rozmiarami, dużą częstością i możliwością wykonywania obsługi, natomiast ich uszkodzenia mogą spowodować poważne konsekwencje eksploatacyjne. Do tych podzespołów może być zaliczana (rys. 8.3) np. pompa oleju roboczego (16), chłodnica oleju roboczego (17), a także elastyczne przewody oleju roboczego oraz filtry oleju. Uproszczony przekrój zespołu śruby nastawnej z wyszczególnionymi elementami przedstawiono na rys. 8.

Jak już wcześniej wspomniano, nie zawsze występuje takie naruszenie struktury konstrukcyjnej śruby, które można uznać za uszkodzenie, ale może wywoływać ono pośrednie konsekwencje, które negatywnie wpływają na pracę śruby nastawnej lub na pracę tylko danego podzespołu śruby nastawnej. W tym przypadku przyczyną zaistnienia konsekwencji uszkodzenia danego detalu lub podzespołu śruby nastawnej jest lokalne naruszenie struktury konstrukcyjnej.



Rys. 8.4 Uproszczony przekrój zespołu śruby nastawnej z wyszczególnionymi elementami Funkcjonalnymi[91]:

1-piasta SN, 2-rufowy tłok piasty, 3-jarżmo cylindra piasty, 4-płat SN, 5-uszczelnienie jarżma cylindra piasty, 6-uszczelnienie płata śruby, 7-zawór zwrotny oleju smarującego piastę śruby, 8-zespół teleskopowych rur oleju roboczego, 9-sprzęgło SKF, 10-blok zaworowy rozrządu oleju roboczego, 11-wysokociśnieniowe uszczelnienie promieniowe, 12-blokada przed obrotem skrzyni zlewowej oleju, 13-zespół mechanicznego sprzężenia zwrotnego, 14-przetwornik pneumatyczno-hydrauliczny sygnału zadawania skoku SN, 15-łożyskowanie skrzyni zaworowej i zlewowej oleju, 16-pompa oleju roboczego, 17-chłodnica oleju roboczego, 18-zadajnik skoku SN

W czasie dalszej eksploatacji może się ono rozwinąć i doprowadzić do globalnego naruszenia struktury konstrukcyjnej śruby nastawnej, co jest równoznaczne z wyłączeniem jej z eksploatacji. Jako przykład mogą posłużyć układy tribologiczne. Można tu wymienić dwa układy, do których dostępność jest skrajnie przeciwna, oraz taki sam zakres obsługi. Są to np. suwak i cylinder zaworu rozrządu oleju roboczego oraz wysokociśnieniowe uszczelnienie promieniowe w miejscu wprowadzenia oleju roboczego do wnętrza obracającego się wału śrubowego (rys. 8.3). W pierwszym przypadku dostępność do zaworu jest niemalże w każdych warunkach eksploatacyjnych i wymiana lub naprawa wymaga jedynie zatrzymania ruchu (pracy) SN, zaś ponoszone koszty wynikają jedynie z konieczności zatrzymania ruchu statku, a jeśli statek stoi w porcie to jedynie pozostają koszty wymienionych części. Natomiast w przypadku drugim, zużycie tego uszczelnienia i jednocześnie łożyskowania, wymaga nie tylko zatrzymania ruchu statku, ale także jego dokowania i całkowitego demontażu zespołu SN. Taka operacja wymaga znacznych nakładów organizacyjnych i inwestycyjnych, a także pojawiają się straty ekonomiczne wynikające z wyłączenia statku z eksploatacji. Wynika stąd wniosek, że różne podzespoły SN mają różne znaczenie w procesie eksploatacji SN, dlatego też zasadnym jest przyjęcie priorytetów w ocenie stanu technicznego, a w konsekwencji takie skonfigurowanie SDG, aby powstał układ grupowy elementów składowych SN, należących do danego rodzaju priorytetów z możliwością rejestracji ich stanów poprzednich i aktualnych. Śruba nastawna jest złożonym obiektem technicznym, dlatego mogą tu znaleźć zastosowanie różne modele diagnostyczne. Biorąc pod uwagę

praktyczną przydatność modelu diagnostycznego, przeznaczonego do zastosowania w warunkach morskich, należy uznać, że korzystne jest zastosowanie modelu topologicznego, zawierającego relacje stan – parametr diagnostyczny oraz parametr diagnostyczny-stan śruby, opisany w rozdziale VII rys 7.6.

Ponieważ w eksploatacji *SN* możliwy jest pomiar i monitoring ciągły uzyskanych danych eksploatacyjnych, można więc na ich podstawie, po odpowiednim przetworzeniu, wnioskować o domniemanym stanie technicznym *SN*. Takie podejście do oceny ma istotne znaczenia praktyczne, gdyż każda nieuzasadniona ingerencja załogi wykonującej obsługę profilaktyczne pogarsza jej strukturę techniczną oraz zwiększa koszty eksploatacyjne, a także może spowodować uszkodzenia, które są skutkiem błędów obsługowych. Ponadto informacja o nieodpowiednim stanie technicznym *SN* może zainicjować działanie załogi po to, aby uchronić ją przed uszkodzeniem, a nawet zniszczeniem. W praktyce eksploatacyjnej domniemany stan techniczny śruby nastawnej można określić jedynie w przybliżeniu przez oszacowanie prawdopodobieństwa jego zajścia, zatem słusznym jest zastosowanie probabilistycznego modelu diagnostycznego do racjonalnego sterowania procesem eksploatacji tej śruby.

8.3 Możliwości weryfikacji opracowanego modelu

W eksploatacji śrub nastawnych (*SN*) występują sytuacje niepożądane, będące wynikiem awarii, znacznego rozregulowania itp. które powodują zaburzenia procesu użytkowania wspomnianych obiektów technicznych, a przy tym, różnego rodzaju emisje, co sygnalizuje zmiany parametrów pracy, przyjmujących wartości poza wartościami uznanymi jako prawidłowe. W przypadku pojawienia się takich symptomów użytkownik musi podjąć działania zaradcze, prowadzące do zapobieżenia negatywnym skutkom niewłaściwego działania *SN* lub co najmniej zmniejszenia tych skutków. Do takiego działania, którego celem jest sformułowanie diagnozy o stanie technicznym *SN*, niezbędny jest system diagnozujący (*SDG*), jako system umożliwiający identyfikowanie stanu technicznego śruby oraz podejmowanie decyzji przez użytkowników tych śrub. Diagnoza powinna być przy tym trafna bądź wiarygodna, oparta na pomiarach wartości parametrów, adekwatnie odzwierciedlających stan techniczny śruby nastawnej. Wartości tych parametrów odczytywane są z mierników pojemnościowych, liniowych, wibroakustycznych, termoelektrycznych, następnie przetwarzane są przez przetworniki sygnałów lub procesy obliczeniowe na postać i wartości przyjęte w realizowanym modelu diagnostycznym [45, 48, 53, 62]. Są to często złożone procesy pomiarowe / obliczeniowe, w wyniku których następuje np. zmiana sygnału z czujnika wibroakustycznego, w następstwie której ujawniony zostaje stopień zużycia łożysk wału śrubowego bądź zużycia kawitacyjnego płatów *SN*, cechującego się różnym stopniem złożoności (np. przeliczenia równoważników kąta wychylenia płatów *SN* – prędkość strugi wody w kręgu pracy śruby). W tym celu mogą być wykorzystywane w procesie przeliczania systemy symulacji komputerowych, jak np. metoda elementów skończonych (*MES*). Zastosowanie technik komputerowych do wspomaganie diagnozowania, np. obliczanie ilości granicznej zawartości wody w oleju roboczym, warunkującej dwa poziomy zagrożenia, jak np. powodowane przez korozyjne oddziaływanie środowiska morskiego na elementy konstrukcyjne *SN* (powodujący stan alarmowy - s_2 , tzw. stan zdatności częściowej) oraz wynikające z niemożności wykonania zadania postawionego przed *SN*, gdyż zostaje osiągnięty stan krytyczny - s_3 tzw. niezdatności), Techniki te bazują na dokładności pomiarów, oraz minimalnych, dających się zdefiniować, zniekształceniach tych sygnałów na liniach torów przesyłowych. Przy wysokim poziomie zakłóceń związki konstytutywne w tworzonym modelu przechodzą z deterministycznych w probabilistycznych, co skutkuje koniecznością podjęcia końcowej decyzji o stanie technicznym *SN* jedynie w kategoriach

prawdopodobieństw zajścia tego stanu np. w sensie zdatny / niezdatny. Dlatego też, aby uzyskać przydatne w praktyce eksploatacyjnej informacje o stanach pośrednich SN (s_2 i s_3), informacje diagnostyczne uzyskiwane w procesie diagnozowania muszą być poddane ocenie pod względem ich wiarygodności. Tworząc model SN która jest SDN , należy uwzględnić wszystkie czynniki wpływające na wiarygodność pozyskiwanych informacji diagnostycznych odwzorowujących stan techniczny śruby, które pozwalają osiągnąć ich praktyczną przydatność diagnostyczną do podejmowania decyzji eksploatacyjnych. Aby taki model spełniał wymagania norm ISO , dotyczących samoregulacji oraz synchronizacji działań pomiędzy wszystkimi urządzeniami zainstalowanymi w układzie napędowym, należy wyspecyfikować główne przyczyny i miejsca powstawania w/w zakłóceń, gdyż one oraz ich kumulacja mogą doprowadzić do skutków katastroficznych.

W procesie diagnozowania, który jest procesem wieloetapowym, zachodzi potrzeba grupowania źródeł powstawania zakłóceń lub błędów pomiarowych zależnie od miejsca ich występowania i przetwarzania, oraz gromadzenia przetworzonych informacji diagnostycznych, w następstwie czego powstaje baza danych.

Zatem można wyróżnić:

1. zbieranie danych – przy czym na jakość zbieranych danych dla celów identyfikacji stanu technicznego mogą mieć wpływ:

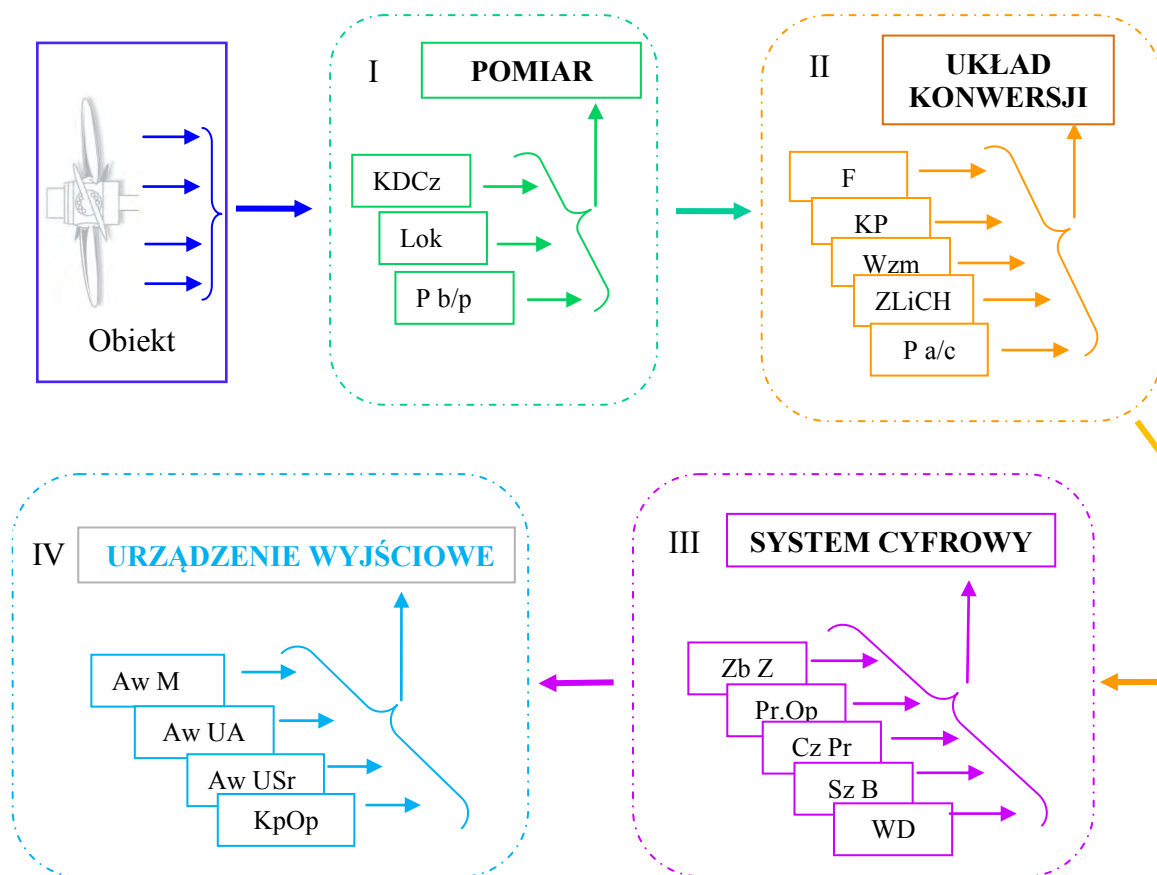
- klasa dokładności zastosowanych czujników i przyrządów pomiarowych, wielkości odchyłek mierzonych wartości oraz metoda oceny błędów,
- miejsca zamontowania czujników (trafność wyboru), które mają istotny wpływ na przydatność mierzonych wskaźników eksploatacyjnych dla procesu racjonalnej oceny stanu technicznego,
- sposób dokonywania pomiaru (pośredni / bezpośredni), który wpływa na stopień złożoności procesu przetwarzania danych, co wynika z faktu, że na każdym etapie przetwarzania sygnałów mogą i pojawiają się błędy, które istotnie wpływają na wiarygodność uzyskanej wartości wskaźnika eksploatacyjnego śruby nastawnej.

2. przesyłanie danych – przy czym zarejestrowane przez czujniki/mierniki sygnały mają różną postać (są elektryczne, magnetyczne, akustyczne, termiczne, w formie ciśnienia, oporu elektrycznego itd.) zależnie od rodzaju badanego parametru. Podlegają one przetworzeniu do postaci wymaganej przez program obliczeniowy lub wymaganą wizualizację (np. impuls cieplny lub ciśnienia zamieniany jest na impuls elektryczny, który po odpowiednim skonfigurowaniu zamieniany jest na graficzną formę prezentowaną na ekranie monitora). Podczas procesu przesyłania zebranych danych i ich przetwarzania są one zniekształcane, czyli obarczone błędami, które zależą od:

- rodzaju i stopnia zabezpieczenia linii przesyłowej przed wpływem zakłóceń zewnętrznych (izolacje, osłony, ekran),
- strat energetycznych wynikających z długości linii przesyłowej od punktu pomiarowego do przetwornika w jednostce centralnej, (zawierają się tu starty mocy, zniekształcenia sygnałów,
- klasy przetworników, czyli ich dokładności przetwarzania, niezawodności, trwałości,
- trafności przyjętej metody do szacowania błędu, jak też określenia przypuszczalnej wielkości sumy błędów w przypadku ich kumulacji.

3. gromadzenie danych i informacji (tworzenie bazy wiedzy) – zebranie danych diagnostycznych i opracowanie informacji, którymi są wyniki przetworzenia danych w systemach operacyjnych. Powinny być one gromadzone w wyodrębnionym module, który komunikuje się z modułem modelowania. Moduł modelowania zawiera dane uzyskane z zainstalowanych na śrubie nastawnej (*jako SDN*) czujników pomiarowych, których wartości są uznane jako wzorcowe, stanowiące wskaźniki identyfikujące stany techniczne SN . Zadaniem SDG jest pomierzenie wartości parametrów diagnostycznych

i porównanie wartości pomierzonych z wartościami wzorcowymi (uzyskanymi z badań modelowych) oraz opracowanie informacji o stanie *SN*, ułatwiających podejmowanie decyzji eksploatacyjnych. Informacje te służyć powinny podjęciu decyzji eksploatacyjnej, że *SN* może być nadal użytkowana bądź decyzji, że powinna być skierowana do obsługi profilaktycznej lub głównej. Wynika z tego konieczność zachowania niezależnego modułu modelowego oraz współpracującego modułu operacyjnego, przy czym dostępność do modułu modelowego powinien posiadać tylko producent i armator, natomiast moduł operacyjny winien posiadać łączność z bazą danych służącą do zbierania danych pozyskiwanych z *SDG* w procesie eksploatacji *SN* oraz informacji eksploatacyjnych dostarczonych przez mechanika. Tak więc zbiór bazy danych stanowią wiedza producenta *SN* jak i wiedza mechanika i armatora zdobyta podczas eksploatacji tego rodzaju śrub. Aktualna dostępność do najnowszych technik obliczeniowych, narzędzi badawczych i bazy danych umożliwia rozbudowywanie baz danych prawie bez ograniczeń, ale należy dążyć starań, aby tylko te dane były zgromadzone, które mają istotne znaczenie dla procesu diagnostycznego. Autor w swoich badaniach diagnostycznych opracował system pomiarowy potrzebny do identyfikacji stanu technicznego *SN*. Schemat realizacji procesu pomiaru parametrów diagnostycznych (badania diagnostycznego) umożliwiający identyfikację stanu technicznego *SN* został przedstawiony na rys. 8.2.



Rys. 8.5 Schemat realizacji procesu pomiaru parametrów diagnostycznych i czynniki wpływające na prawidłową pracę i przysposobienie *SDG* do identyfikacji stanu technicznego *SN*: I – Moduł zbierania danych, pomiarowy; KDCz – klasa dokładności czujników pomiarowych, Lok – lokalizacja czujników pomiarowych, P b/p – pomiar bezpośredni / pośredni; II – Moduł obróbki i przesyłania danych, ZLiCH – zabezpieczenie linii i jej charakterystyka, KP – klasa przetworników, F – filtry, Wzm – wzmacniacze sygnału; Pa/c – przetworniki analogowo cyfrowe; III – Moduł gromadzenia danych i wypracowania sygnału wyjściowego z *SDG*, Zb Z – zabezpieczenie zasilania, PrOp – program

operacyjny, CzPr – czas próbkowania, SzB- szacowanie błędu, WD – weryfikacja danych; IV – Peryferyjne urządzenia wyjściowe, Aw.M – awaria monitora, AwUA – awaria układu alarmowego, AwUSr – awaria układu samoregulacji, KpOp – kompetencje operatora

W procesie gromadzenia danych istotniejszym jest nie ilość gromadzonych danych, lecz ocena wiarygodności i trafności informacji diagnostycznych przy aplikacyjnej identyfikacji stanu śruby nastawnej. Jak wynika z wcześniej opisanych stanów, dla ich identyfikacji wymagana jest baza danych pochodząca z wcześniejszych przedziałów czasu eksploatacji *SN* lub rodziny śrub podobnych. Korzystając z takiej bazy danych można stwierdzić, że w przypadku stanów:

- s_1 , stan pełnej zdatności – identyfikacja może być dokonana na podstawie wskaźników z projektowych bazy danych, które są weryfikowane przez producenta na stanowisku badawczym (próby w basenach doświadczalnych) oraz wyników uzyskanych z prób morskich w ściśle określonych warunkach pływania. Wiarygodność powyższych baz danych uzależniona jest od jakości urządzeń pomiarowych, zastosowanego *SDG*, oszacowania błędów pomiarowych, sumienności podczas dokonywania pomiarów, powtarzalności uzyskanych wyników oraz porównywalnych warunków pomiaru przy zastosowaniu porównywalnych do tych warunków adekwatnych wskaźników.

- s_2 , stan częściowej zdatności – identyfikacja może być dokonana na podstawie wskaźników z projektowych bazy danych, które mogą być traktowane jako wartości ze zbioru wartości granicznych, które są weryfikowane podczas testów badawczych wykonywanych przez producenta (np. symulacji uszkodzenia płata śruby i związane z tym generowanie drgań). Podobnie i tutaj wiarygodność baz danych zależna jest od jakości użytych narzędzi pomiarowych, zastosowanego *SDG*, oszacowanie błędów pomiarowych, sumienności dokonania pomiaru oraz porównywalnych warunków pomiaru przy zastosowaniu porównywalnych do tych warunków wartości adekwatnych wskaźników.

- s_3 , stan niezdatności – identyfikacja może być dokonana na podstawie wskaźników z projektowych bazy danych, jako wartości uzyskane z symulacji uszkodzeń elementów i układów śruby nastawnej jak również wpływ tych uszkodzeń na pracę całego zespołu *SN*. Stanowią one (wpisane w bazę danych) zbiór wartości nieakceptowanych przez producenta, które są weryfikowane podczas testów badawczych lub podczas eksploatacji grup podobnych śrub nastawnych. Zasadnym jest tu tworzenia bazy danych dla stanu pracy w warunkach awaryjnych (praca w trybie awaryjnym).

Jak wynika z powyższego cechą wspólną wpływającą na wartość i wiarygodność baz danych, a tym samym obarczenie danych zgromadzonych w tych bazach błędami jest: jakość użytych narzędzi pomiarowych, programów symulacyjnych (możliwości dokładnego przełożenia danych teoretycznych na dane mogące zaistnieć w warunkach rzeczywistych), zastosowanego *SDG*, odpowiednie szacowanie błędów pomiarowych, sumienne wykonywanych oraz porównywalność warunków pomiaru przy zastosowaniu w tych warunkach adekwatnych wskaźników.

4. zastosowanie w praktyce eksploatacyjnej (użytkowanie) zgromadzonych danych

w przypadku pojawienia się stanu s_2 , użytkownik *SDG* sprawdza stan *SN* poprzez badanie tych parametrów jej pracy (korzystając z bazy danych diagnostycznych, historii eksploatacji), które mogą być pomocne w postawieniu diagnozy o stanie *SN*. Po stwierdzeniu zaistniałej sytuacji użytkownik zmierza do uzyskania odpowiedzi na pytania:

- co jest przyczyną powstania sytuacji problemowej wywołanej pojawieniem się stanu s_2 ,

- podjęcie jakich działań będzie odpowiednie aby usunąć przyczyny i skutki zaistniałego stanu s_2 oraz zapobiec powstaniu podobnej sytuacji w przyszłości.

Rozpoznanie sytuacji awaryjnej następuje poprzez identyfikację pojawiających się symptomów, przez rejestrowanie za pomocą czujników, mierników wartości parametrów diagnostycznych zależnych od stanu pracy SN . Wartości tych parametrów są przesyłane do baz danych, w postaci zakodowanych sygnałów, gdzie po przetworzeniu są gromadzone, oraz prezentowane mechanikowi (forma prezentacji decyduje o trafności odczytu danej informacji) biorącemu udział w procesie diagnozowania. Tak więc do opracowania diagnozy niezbędne jest porównanie aktualnych danych eksploatacyjnych z modelowymi danymi (zawartymi w module modelowym bazy danych) uznany za dane wzorcowe. Ich uzupełnieniem mogą być dane uzyskane od kompetentnego operatora. Oba te źródła danych mogą tworzyć bazę danych wzorcowych. W takim ujęciu, możliwość wykonania operacji porównania danych jest zależna w większym stopniu od możliwości percepcyjnej mechanika, niż urządzenia diagnostycznego, które nie ma zdolności myślenia abstrakcyjnego (jest ono wyposażone w skończony układ obliczeniowy), a zatem nie ma możliwość zdefiniowania i skorygowania występujących błędów podczas diagnozowania. Ponieważ pojemność baz danych i zawarte w nich wartości parametrów są praktycznie nieograniczone, w przeciwieństwie do zdolności zapamiętywania adekwatnych informacji przez mechanika, stanowią one bardziej wiarygodną podstawę do podejmowania decyzji eksploatacyjnych. Wobec tego pojawia się pewien paradoks, polegający na tym, że z jednej strony występują oczywiste ograniczone możliwości jednoznacznej interpretacji wyników badań diagnostycznych przez SDG , ale dostarczają dane o dużej dokładności pomierzonych parametrów, z drugiej zaś strony operator ma szerokie możliwości interpretacyjne (zdolność myślenia abstrakcyjnego mechanika), lecz obciążone dużą nieraz subiektywnością. Dlatego też zastosowanie odpowiednio skonfigurowanych filtrów i systemu priorytetów, przez co można problem ten ograniczyć, poprzez wprowadzenie sprzężeń informacyjnych zwrotnych w systemach operacyjnych SN . Podczas użytkowania SN , zachodzące zdarzenia następujących według ciągu przyczynowo-skutkowego, który jest modyfikowany działaniami podejmowanymi przez załogę i kończy się sytuacją, mającą określone konsekwencje ekonomiczne. Ponieważ tworzone bazy danych mają służyć formułowaniu diagnozy określającej stan techniczny śruby nastawnej, istotnym zagadnieniem jest sposób przetwarzania danych i ich wizualizacji. A więc wynik działania SDG , którym jest diagnoza, zależy od dokładności określenia wartości parametrów diagnostycznych potrzebnych mechanikowi do poprawnej identyfikacji stanu technicznego śruby nastawnej. Diagnoza ta ułatwia podjęcie racjonalnych działań eksploatacyjnych. W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych identyfikacja stanu SN opiera się na ciągu zdarzeń, które tworzą proces diagnostyczny złożony z:

- dokonywania badań diagnostycznych i gromadzenia informacji diagnostycznych przez system diagnozujący (SDG), podczas rzeczywistego czasu eksploatacji śruby nastawnej,
- porównywania bieżących wskaźników eksploatacyjnych ze wskaźnikami zawartymi w bazie danych opracowanych przez producenta oraz z wyznaczonymi przez producenta stanami s_1, s_2, s_3 ,
- weryfikacji procesu diagnostycznego w oparciu o dostarczone przez SDG informacje i doświadczenie mechanika/operatora, jego badań metodami organoleptycznymi, oraz jego kompetencje psychofizyczne. Oczywiście jednak jest i to, że każdy mechanik (operator SD) posiada różną wiedzę i doświadczenia, co nie zawsze musi wpłynąć na pozytywne efekty w postaci trafnej i wiarygodnej diagnozy, a więc na wyznaczenie trendu zmian na podstawie wyników oceny powyższych działań diagnostycznych,
- prezentacji wypracowanych sugestii działań, które powinny nakłonić mechanika do podjęcia racjonalnych decyzji eksploatacyjnych.

Działania eksploatacyjne mechanika realizowane zgodnie z podjętymi decyzjami są na podstawie diagnozy, opracowanej w oparciu o zdobyte informacje w trakcie własnych badań organoleptycznych, jak i w oparciu o informacje z *SDG*, będącego narzędziem służącym do wspierania w podejmowaniu racjonalnych decyzji eksploatacyjnych. Uwzględniając fakt, że każdy mechanik posiada inną wiedzę i umiejętności techniczne oraz inne doświadczenia zawodowe, można i należy spodziewać się właściwych decyzji podejmowanych przez niego w przypadku zastosowania *SDG*. Pomimo wprowadzania coraz to bardziej zaawansowanych techniczne podsystemów diagnostycznych (*SD*), a szczególnie podsystemów diagnozujących (*SDG*), w dalszym ciągu najistotniejszą rolę w procesie eksploatacji odgrywa mechanik z wiedzą, która dotyczy eksploatacji śrub nastawnych, a w mniejszym stopniu wiedza z zakresu konstruowania wspomnianych urządzeń. Dlatego systemy *SDG* zastosowane na statku wspierające decyzje mechanika, powinny być tak skonfigurowane, aby umożliwiły wspólne działanie:

- mechanika na statku, który zbiera dane dostarczone przez które *SDG* mogą być obciążone błędami pomiarowymi (np. dotyczącymi wskaźników skoku śruby nastawnej, czy procentowej zawartości wody w oleju roboczym), wynikać z uszkodzeń czujników, linii przesyłowych lub zakłóceń w systemach przetwarzających sygnały, skomplikowanych programów obliczeniowych. To wszystko łącznie wpływa na pogorszenie czytelności opracowanych wyników końcowych (niejasna wizualizacja, brak priorytetów, itd.); *SDG* prezentuje wynik tak dobrze, jak dobrze został skonfigurowany, wykonany i zależnie od jakości jego użytkowania i obsługiwania,
- inspektorów technicznych armatora, korzystających z informacji przekazanych ze statku, własnej armatorskiej bazy danych oraz swojego (subiektywnego) doświadczenia, lecz nie mających kontaktu ze statkiem,
- ekspertów producenta, którzy dokonują oceny stanu technicznego również na podstawie danych dostarczonych ze statku, i mają dostęp do własnych baz danych (zawierające często nie- publikowane dane ze zgłoszonych awarii, czy prób badawczych), a przy tym korzystają z własnego, także subiektywnego doświadczenia, ale nie mają kontaktu ze statkiem.

Taka współpraca (mechanik, inspektor, ekspert) powinna przynieść skutek większy niż gdyby ich działania były prowadzone oddzielnie. Wsparcie tej współpracy odpowiednim systemem *SDG* daje klasyczny i pożądany układ synergiczny. Jednakże ostateczna decyzja działania i jej wykonanie pozostaje po stronie mechanika, za które ponosi całkowitą odpowiedzialność. Ma on jednak dodatkowy atut, jakim jest bezpośredni kontakt ze śrubą nastawną, (czego nie posiada inspektor i ekspert), co daje możliwość pozyskania dodatkowych informacji diagnostycznych, których nie może podać *SDG* (np. wynikająca z nietrafnej lokalizacji czujników, błędnych odczytów i zakłóceń podczas przesyłu danych i ich przetwarzania). W takiej sytuacji są istotne korzyści wynikające z zastosowania, przez mechanika dodatkowo metod diagnostyki organoleptycznej wynikające ze zwiększenia wiarygodności diagnozy. Dobrze wyszkolony mechanik powinien posiadać umiejętność rozpoznawania nieprawidłowości eksploatacyjnych zachodzących w siłowni, dotyczących zainstalowanych w niej urządzeń. Powinien także wskutek zdolności abstrakcyjnego myślenia radzić sobie w nietypowych warunkach działania np. nagle zatrzymanie *SG* i w efekcie praca turbinowa *SN*, czy przegrzanie hydraulicznego oleju roboczego wpływające na zmianę struktury materiału. Tego rodzaju zdarzenia są trudne do wykrycia w procesie eksploatacji *SN*, a przy tym mają duży wpływ na pracę całego układu napędowego statku.

Każdy układ automatycznej regulacji jak i układ wspomaganie decyzyjnego pracuje według programu adekwatnego do funkcji, jaką temu układowi przypisano, i pomimo zastosowania filtrów informatycznych, transformatorów separacyjnych, priorytetów, podlega

zmianom własnej struktury wewnętrznej, która wpływa na pracę SN i przysposobienie *SDG* do badań śruby nastawnej jako *SDN*. Wyszczególnić tu można układ modułowy poszczególnych operacji funkcyjnych jak:

- strukturą organizacyjną systemu diagnostycznego (*SD*), czyli *SDG* i *SDN*,
- strukturę techniczną pomiaru parametrów
- strukturę organizacyjną pomiarów,
- moduł bieżących pomiarów diagnostycznych,
- moduł analizy danych,
- moduł diagnozowania,
- moduł wsparcia podejmowania decyzji eksploatacyjnych.

Poszczególne struktury i moduły posiadają własną różniącą się między sobą funkcyjność, ich charakter ukazuje, jak złożonym jest proces podejmowania decyzji eksploatacyjnych. Dlatego istotnym jest odpowiednio dobrana struktura i połączenia funkcyjne pomiędzy poszczególnymi modułami operacyjnymi. W ocenie autora strukturę tę można podzielić według przypisanych funkcji modułom, czyli przypisanym zadaniom, co przedstawiono na rys. (nr 8.3). Rozbudowa takiego modułowego *SDG* zależy od decyzji armatora, który bierze pod uwagę konieczność jej zastosowania oraz koszty, jakie jest gotowy ponieść przy realizacji takiego projektu. Podstawowy moduł musi spełniać wymagania Towarzystw kwalifikacyjnych, ubezpieczyciela i wymagań Administracji Morskiej Państwa, przy konstrukcyjnej możliwości dalszej rozbudowy *SDG*. Aby *SDG* spełniał wymogi założeń projektowych i zapewniał oczekiwaną skuteczność funkcyjną, winien być, według autora, strukturą równoległo-warstwą. Układ strukturalny takiego *SDG* może być podzielony, zależnie od przeznaczenia na moduły:

- moduł kontrolno-pomiarowy (podstawowy moduł *KP*), przeznaczony do pracy tylko w stanie pełnej zdatności (s_1), zadaniem którego jest utrzymanie parametrów pracy w granicach zadanych wartości uznanych przez operatora za prawidłowe,
- moduł porównawczo-kontrolny (moduł *PK*), przeznaczony do porównania pomierzonych wartości parametrów diagnostycznych z wzorcowymi wartościami tych parametrów, w którym generowany jest sygnał alarmowy,
- moduł informacyjno-doradczy (moduł *ID*), przeznaczony do kształtowania trendów zmian pomierzonych parametrów jak i identyfikacja miejsca wystąpienia przyczyny stanu zdatności (s_2) z jednoczesną prezentacją oceny działania śruby nastawnej w formie liczby z jednostką miary dziesiętna, określającej możliwość dalszego zastosowania śruby nastawnej (*SND*) do wykonania przez nią postawionego.
- moduł porównawczo-kontrolny.

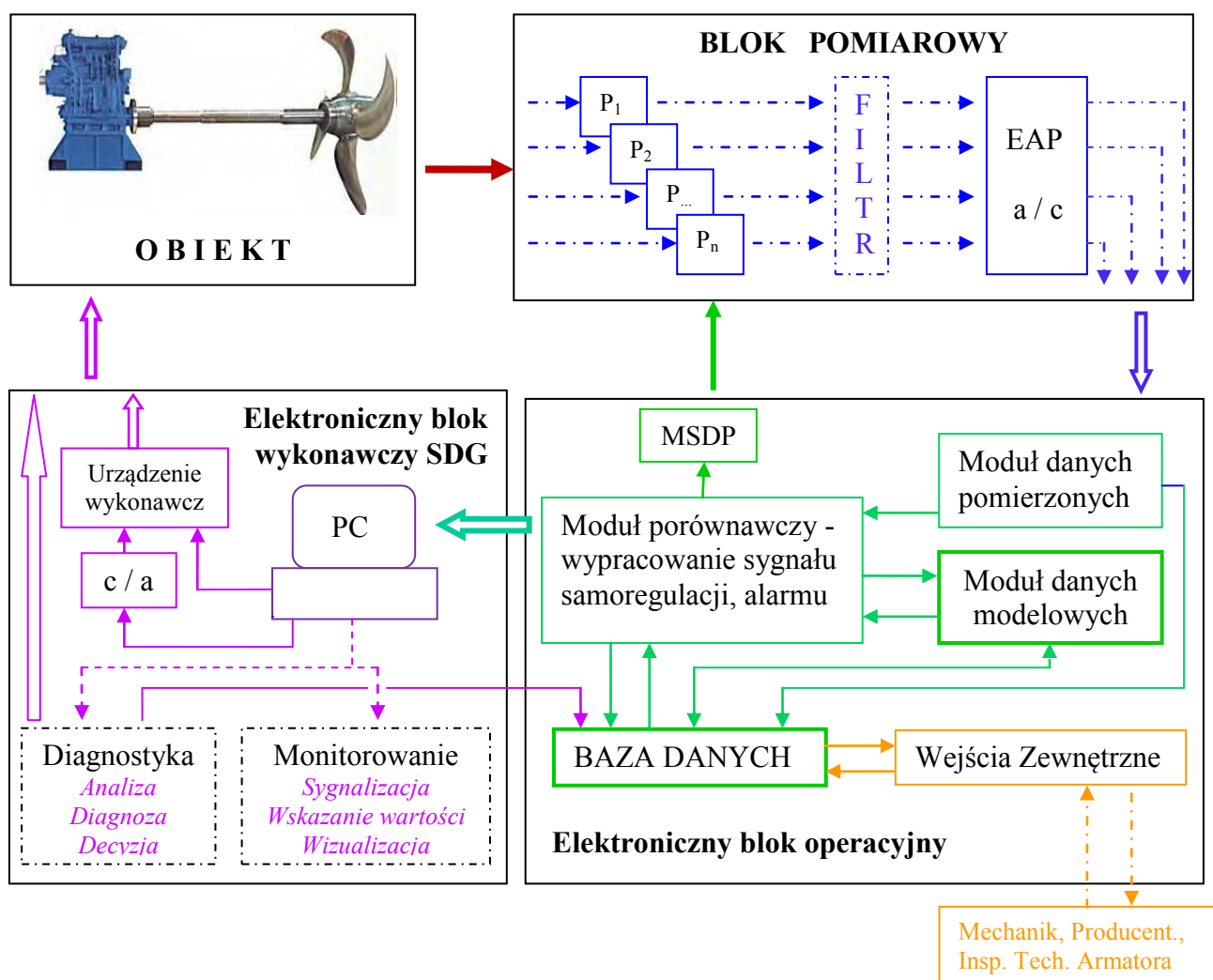
W systemie tym (*SDG*) pierwszą podstawową grupą są czujniki pomiarowe umożliwiające pomiary poszczególnych parametrów diagnostycznych, a zadaniem modułu *KP* jest przesyłanie sygnału równoległe do modułu porównawczo-kontrolnego i informacyjno-doradczego.

W module porównawczo-kontrolnym następuje zweryfikowanie pomierzonych wartości parametrów, i jeśli zawierają się w zbiorze wartości uznanych za prawidłowe, to odpowiednio wypracowany sygnał przesyłany jest do modułu informacyjno-doradczego. W sytuacji, gdy wartości pomierzonych parametrów nie zawierają się w zbiorze wartości uznanych za prawidłowe, to generowany jest przez (*SDG*) odpowiednio wypracowany sygnał samoregulacji (*SDN*), a wyniki jego wartości oczekiwanej prezentowane są w module informacyjno-doradczym. Aby informacja z modułu informacyjno-doradczego była jasna i nie zniekształcała obrazu stanu rzeczywistego śruby nastawnej (*SDN*), winna być prezentowana jednym sygnałem (liczbą z dziesiętną), natomiast trendy mierzonych

wartości różnych parametrów diagnostycznych na życzenie operatora, (mechanika) szczególnie w sytuacji alarmowej, powinny być automatycznie prezentowane. Wizualizacja wyników wypracowanych przez *SDG* jest najskuteczniejszą i najprostszą formą prezentacji stanów *SDN* śruby, co wynika z tego, że jednoznaczna identyfikacja stanu tej śruby daje możliwość oceny jakościowej, ilościowej istotnych zmian zachodzących w jej mechanizmach (*MZSS, MOS, NSN*).

Zaletą tych systemów jest to, że mechanik nie skupia się na konkretnych wartościach parametrów (podczas pracy siłowni jest ich ogromna ilość i pojawia się problem ich zapamiętywania), lecz na szybkości i zakresie zachodzących zmian, co umożliwia właśnie prezentacja trendów zmian tych wartości.

Według autora, taka konfiguracja *SDG*, która pozwala opracować prognozę i genezę (ciąg zdarzeń) umożliwia określenie konsekwencji na podstawie doświadczeń producenta i operatora uzyskanych w fazie eksploatacji.



Rys. 8.6 Ideowy schemat systemu *SDG* przysposobionego do Identyfikacji stanu technicznego *SN*: $P_1, P_2, P_{...}, P_n$ – pomiary, *EAP a/c* – elektroniczna aparatura pomiarowa analogowo/cyfrowa, *MSDP* – moduł stymulacji dodatkowego pomiaru

Wskazana jest zatem stała rejestracja wartości parametrów diagnostycznych i wykrywanie przekroczeń (jeśli zaistnieją) wartości granicznych tych parametrów, umożliwiających identyfikację stanów. W wyniku tego powstanie zbiór informacji dla producenta, który może

określić poziom potencjału eksploatacyjnego śruby w oparciu o ten zbiór, oraz na podstawie wiedzy z innych badań eksperymentalnych i bazy danych pochodzących z eksploatacji *SN*.

Oczywistym jest, że ten model diagnostyczny i zaproponowany na jego podstawie *SDG SN* wymaga określenia kosztów zainwestowanych przez armatora jak i zestawienia ich z kosztami wynikającymi z ewentualnych strat wynikłych z zaistnienia awarii *SN* a w konsekwencji ewentualnego wyłączenia statku z eksploatacji. Tak więc nie tylko naukowym ale także zdroworozsądkowym podejściem jest takie skonfigurowanie *SDG* na podstawie zaproponowanego modelu diagnostycznego *SN*, aby wspomóc optymalizowanie decyzji mechanika stosownie do pojawiających się problemów eksploatacyjnych i ekonomicznych związanych z działaniem śruby.

8.4 Propozycje rozbudowy opracowanego modelu

Aktualnie prowadzone badania nad stosowanymi materiałami do konstruowania *SN* [47], nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi zmierzającymi do podwyższenia jej sprawności ogólnej oraz niezawodności [1, 3, 6, 12, 21, 30, 36, 58, 56], jak również działania zmierzające do udoskonalania aparatury i metody pomiarowej [11, 13, 19, 21, 63, 65] będą istotą dalszego rozwoju tego rodzaju pędników okrętowych i ich systemów diagnozujących (*SDG*). Aktualnie stosowane *SDG* umożliwiające nadzór śrub nastawnych nie są w pełni reprezentatywne do oceny stanu technicznego tych śrub, lecz dają możliwości objawowej oceny ich stanu. Dla potrzeb pełnego wykorzystania konkretnego *SDG* należy odpowiednio przysposobić *SDN* śruby nastawnej poprzez zainstalowanie odpowiednich czujników w wybranych miejscach konstrukcji *SN*. Takie rozwiązanie pociągać będzie za sobą potrzebę wykonania odpowiednich otworów montażowych, gniazd, a co za tym idzie ingerencję w strukturę konstrukcyjną śruby nastawnej. Jakkolwiek technicznie jest to możliwe do wykonania, to jednak stanowić może źródło drgań, pojawienie się zjawiska karbu, naprężeń mechanicznych, przegrzania czujników pomiarowych, co będzie stanowić dodatkowe obciążenia układu pomiarowego. Ponadto interesujące nas punkty pomiarowe znajdują się w obracających się elementach konstrukcyjnych śruby nastawnej, co dodatkowo stwarza problemy natury konstrukcyjnej i przesyłu wartości pomierzonej do bloku analizującego zebrane dane z układu. Istotną cechą zastosowanych czujników jest ich bezwładność pomiarowa i bezwładność układu przesyłania danych do układu ich przetwarzania systemu diagnozującego (*SDG*).

Do zbudowania w pełni adekwatnego systemu diagnozującego, nadzorującego aktualny stan techniczny śruby nastawnej, nieobarczonego nadmiernymi zakłóceniami, a tym samym umożliwiającego opracowanie trafnej diagnozy, konieczne jest zastosowanie nieinwazyjnych metod zbierania informacji diagnostycznych oraz określenie tych parametrów, które w sposób najszybszy i jednoznacznie zasygnalizują określają zmianę stanu *SN*. Zastosowanie znaleźć powinny tu czujniki wibroakustyczne, tensometryczne, endoskopia, torsjometry, analizatory fizyko-chemiczne mediów roboczych. Wszystkie te możliwości zwiększą wiarygodność wprowadzanych do systemu informacji, co jest warunkiem koniecznym opracowania diagnozy, czyli oceny aktualnego stanu. Jako przykład może posłużyć stan fizyko-chemiczny oleju roboczego. W hydrostatycznych układach hydraulicznych nośnikiem wymaganej siły do zmiany skoku śruby jest olej hydrauliczny. Jego zawadnienie powyżej wartości dopuszczalnej (zazwyczaj przy poziomie 3,6 % olej traci właściwości jednorodności, czyli przestaje być płynem newtonowskim) powoduje niestabilność zadanej wartości skoku śruby, a ponadto pojawia się korozyjne oddziaływanie takiej cieczy na elementy konstrukcyjne, co jest widoczne dopiero po zaistnieniu innej niesprawności lub demontażu tego elementu [Załącznik 2]. Ponadto biodegradacja oleju zgromadzonego w zbiorniku obiegowym wskutek działania bakterii może doprowadzić do całkowitej utraty cech wymaganych przez ciecze hydrauliczne

[57, 59, 73, 75, 104]. Okresowość w ocenie jakości oleju roboczego (wysyłanie próbek do badania co 6 m-cy) jest niewystarczająca dla utrzymania wymaganego stanu i niezawodności mechanizmów (układów) *SN*. Z powyższego wynika, że nowoczesny system diagnozujący musi między innymi spełniać kilka warunków takich jak:

- a. zawierać nieniszczące metody pomiarowe,
- b. zapewniać trafność miejsca montażu czujników,
- c. mieć małą bezwładność zastosowanych czujników,
- d. zapewnić szybkość przesyłu informacji diagnostycznych,
- e. umożliwić monitoring ciągły (np. w formie ujednoliconej liczby z jednostką miary dziesiętna, do oceny działania *SN*) stanu technicznego *SN* z możliwością odczytu aktualnych wartości parametrów diagnostycznych stanowiących podstawę do oceny stanu technicznego,
- f. zapewnić łączność statkowej bazy danych z bazą danych armatora i producenta *SN*.

Ponieważ w większości przypadków, budowa śrub nastawnych, a tym samym wzajemna zależność funkcyjna (struktura konstrukcyjna) jej elementów konstrukcyjnych, jest nieznaną w sposób wystarczający przez załogi statków, zatem tendencje udoskonalenia opracowanego modelu są uzasadnione, co w znaczny sposób przyczyni się do zwiększenia trwałości i bezawaryjności, a przez to do bezpieczeństwa statku.

Z uwagi na okresową dostępność do poszczególnych mechanizmów śruby nastawnej (*MOS*, *MZSS*, *NSN*, ale wyłącznie podczas postoju statku na doku), jak również małą wiedzę załogi obsługującej te mechanizmy w zakresie hydrauliki siłowej i występujących wzajemnych zależności pomiędzy obciążeniem mechanicznym śruby i układem jej sterowania, jak i nagłych zmian warunków pracy wynikających z zadziałania układów bezpieczeństwa napędu głównego, warto prowadzić dalsze badania nad śrubami nastawnymi, aby przez identyfikację ich stanu technicznego i stosownie do wyników tej identyfikacji podwyższyć ich sprawność ogólną i tym samym bezpieczeństwo statku.

8.5 Dalsze kierunki badań

Śruby nastawne, w przeciwieństwie do innego rodzaju urządzeń okrętowych działają w znacznie zróżnicowanych warunkach morskich. Warunki morskie są zmienne i przewidywalne tylko z określonym prawdopodobieństwem, a co za tym idzie śruby nastawne podlegają stochastycznie zmiennym warunkom pracy. Jak już wcześniej wspomniano, stan techniczny śruby nastawnej zależy nie tylko od jej zużycia, ale również od kwalifikacji załogi, a zatem zależy od przypadkowego doboru obsady mechaników na statku. W takiej sytuacji istotnego znaczenia nabiera diagnostyka techniczna, od której zależy jakość zadań eksploatacyjnych, w tym szczególnie obsługa profilaktycznych. W prowadzonych badaniach, w ramach tego doktoratu, zastosowano metody eksperckie do określenia niektórych wartości danych eksploatacyjnych, np. niezawodności, własne długoletnie doświadczenie zawodowe związane z pracą mechanika i badaniami empirycznymi oraz wykorzystano zasoby bazy danych armatorskich służb technicznych. W dalszych badaniach wskazanym byłoby, aby w ramach weryfikacji danych eksploatacyjnych, które zostały zgromadzone metodą ekspercką utworzyć centralną bazę danych dotyczących zaistniałych stanów technicznych i prawdopodobnych przyczyn ich powstania. W bazie tej byłoby dobrze wyselekcjonować te stany *SN*, które mają cechy wspólne dla podobnych objawów zewnętrznych (np. oscylacja pozycji płatów *SN* wokół zadanej wartości skoku), a następnie zastosować badania statystyczne nad niezawodnością poszczególnych podzespołów *SN*. Badania statystyczne wspomnianych podzespołów *SN* (*MOS*, *MZSS*, *NSN*, i śruby właściwej) objąć powinny:

- elementy śruby nastawnej zainstalowane za kadłubem,

- węzły konstrukcyjne, takie jak pompa olejowa, zawory rozrządu oleju siłowego, zawory zwrotne, filtry, układy tribologiczne (układ tłok-cylinder w piasku *SN*, łożyskowanie mechanizmu zmiany skoku śruby *MZSS*, suwakowy rozdzielacz oleju),
- systemy śruby nastawnej,
- całego zespołu śruby nastawnej (jako *SDN*),
- poszczególne elementy składowe systemu diagnozującego,
- układy *SDG*,
- współpracujące układy *SDN – SDG*, a zatem całego *SD*,

Z uwagi na okresową dostępność do poszczególnych mechanizmów śruby nastawnej (wyłącznie podczas postoju statku na doku), jak również małą wiedzę załogi eksploatującej mechanizmy *SN*, w zakresie hydrauliki siłowej i występujących wzajemnych zależności pomiędzy obciążeniem mechanicznym śruby i układem jej sterowania oraz nagłych zmian warunków pracy wynikających z zadziałania układów bezpieczeństwa napędu głównego, warto prowadzić dalsze badania nad śrubami nastawnymi, aby podwyższyć sprawność ogólną tych śrub, ich trwałość i niezawodność oraz bezpieczeństwo statku.

8.6 Uwagi i wnioski

Z przedstawionych rozważań wynika, że w przypadku zastosowania statystycznej teorii decyzji do podejmowania decyzji eksploatacyjnych nie ma potrzeby dokładnego określania wiarygodności bądź trafności diagnozy śrub nastawnych. Podejmowanie racjonalnych decyzji eksploatacyjnych wymusza stosowanie tej teorii. Teoria ta umożliwia tworzenie modeli matematycznych do podejmowania decyzji w warunkach niepewności. Wyjaśnia ona, jak należy dokonywać wyboru decyzji ze zbioru decyzji możliwych do podjęcia, gdy między innymi stan urządzenia (np. śruby nastawnej) niezbędnego do osiągnięcia danego celu, nie może być dokładnie określony. Teoria ta, jak wynika także z rozważań przedstawionych w pracy, może być zastosowana w działalności eksploatacyjnej, w zakresie podejmowania decyzji w stochastycznej sytuacji decyzyjnej, w której istotne są konsekwencje podjęcia poszczególnych decyzji.

Możliwość zastosowania bayesowskiej statystycznej teorii decyzji w działalności eksploatacyjnej wynika z dwóch powodów. Pierwszy to ten, że została w niej uwzględniona probabilistyczna koncepcja wartości. Druga to ten, że przyczyną opracowania tej teorii było spostrzeżenie, że nie można oddzielić subiektywnych elementów analizy decyzyjnej od jej czynników obiektywnych, a to jest właśnie przyczyną podejmowania decyzji, których wykonanie nie gwarantuje uzyskanie zamierzonego rezultatu (wyniku działania) z całkowitą pewnością. Jest tak dlatego, że decydowanie odbywa się w warunkach niepewności, które kształtują z reguły:

- czynniki losowe wpływające na realizację różnych decyzji procesów, także procesu eksploatacji śrub o skoku nastawnym, ale także,
- ograniczony (nieraz znacznie) zakres informacji, zwłaszcza o stanie technicznym tych śrub.

W bayesowskim podejściu do problemu podejmowania decyzji w warunkach ryzyka statystycznego uznaje się, że:

- konsekwencje (skutki) podjętych decyzji zależą od stopnia rozpoznania losowych, istotnych (wpływających na skutki tych decyzji) czynników, które w tym przypadku nazywane są stanem natury, a który może być na przykład stan techniczny jakiegoś urządzenia (np. śruby o skoku nastawnym),
- uzyskanie dodatkowych (nowych) informacji o istniejącym stanie natury nie zawsze umożliwia wyciągnięcie oczekiwanych wniosków, do których można byłoby mieć pełne (lub wystarczająco duże) zaufanie,

- uzyskanie dodatkowych informacji o istniejącym stanie natury (w przypadku powstania wątpliwości, czy dotychczas uzyskane informacje są wystarczające do podjęcia decyzji lub też dostatecznie wiarygodne) nie zawsze jest ekonomicznie uzasadnione i dlatego tych informacji nie ma,
- można założyć, że nieprecyzyjność opisu faktycznego stanu technicznego śrub o skoku nastawnym, czyli niepewność co do wartości własności tego stanu, da się określić (wyrazić) za pomocą prawdopodobieństwa, wskutek czego decydent (osoba decydująca) ma możliwość ustalenia ryzyka decyzji i dokonania analizy decyzyjnej w wyniku której, jest on w stanie podjąć optymalną decyzję eksploatacyjną, przyjmując za kryterium optymalizacji wartości oczekiwane $E(s/d)$ konsekwencji c przy założeniu, że została podjęta decyzja d .

Podjęcie decyzji eksploatacyjnej polega na wyborze decyzji optymalnej należącej do zbioru decyzji możliwych do podjęcia, czyli takiej, której odpowiada największa wartość oczekiwana konsekwencji.

Do oszacowania, niezbędnych do podjęcia jednej z możliwych decyzji $d_k(k=1,2,3)$, wartości oczekiwane $E(c/d_k)$ konieczna jest znajomość prawdopodobieństw $p(s_i)(i=1,2,3)$.

Rozdział IX

9. Podsumowanie

W pracy, której celem było opracowanie modelu diagnostycznego śrub o skoku nastawnym dla potrzeb sterowania procesem ich eksploatacji, autor przedstawił rozważania, które potwierdziły słuszność przyjętej hipotezy wyjaśniającej fakt, że do prognozowania stanu technicznego śruby nastawnej wystarczy znajomość jej aktualnego stanu, w danej chwili, bez konieczności uwzględniania stanów, jakie były wcześniej. Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiły także udowodnienie przyjętej w pracy tezy, że zastosowanie probabilistycznego modelu diagnostycznego śruby nastawnej umożliwi bardziej racjonalne sterowanie procesem eksploatacji tego rodzaju pędników.

W pracy, autor przedstawił w ujęciu systemowym problemy eksploatacji śrub nastawnych (*SN*) i identyfikacji ich stanów technicznych, a także istotę bezpieczeństwa współczesnej eksploatacji zespołu napędowego wyposażonego w taki pędnik. Zaproponowany został oryginalny model diagnostyczny śrub nastawnych, który jest probabilistycznym modelem symptomowym, odwzorowującym relacje między wyróżnionymi stanami technicznymi *SN* a parametrami diagnostycznymi umożliwiającymi identyfikację wspomnianych stanów.

Wykazano znaczenie śrub nastawnych w żegludze morskiej, ich trudne warunki użytkowania (duża częstość wykonywania manewrów polegających na obracaniu skrzydeł tych śrub wokół własnych osi) i związana z tym konieczność diagnozowania ich stanu technicznego.

W pracy zwrócono uwagę, że instrukcje załączone do dokumentacji eksploatacyjnej śrub nastawnych jako *DTR*, obejmują ogólne informacje o budowie i zasadach ich działania. Zawierają jedynie zakres prac rutynowych, obsług profilaktycznych i głównych oraz tzw. tabelę podstawowych niesprawności i błędów eksploatacyjnych. Autor wykazał także, że jest to zakres wiedzy niewystarczający do racjonalnej eksploatacji tego tak złożonego urządzenia. Autor wykazał także, że na ogół producenci *SN*, aby podołać wymaganiom rynku, oferują produkt w myśl zasady: „maksymalna sprawność przy możliwie najprostszej obsłudze profilaktycznej”, lecz wykazał przy tym, że aby ta zasada była w pełni możliwa do realizacji, wymagane są prace badawcze proponowane w rozdziale VIII. Ponieważ *SN* różnych producentów różnią się między sobą konstrukcyjnie, należy tworzyć modele diagnostyczne opcjonalne, dostosowane do tych konstrukcji i zadań jakie są im stawiane, bądź uniwersalne w oparciu o pomiary podstawowych parametrów pracy, które identyfikują ich stan techniczny, niezależnie od zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, pozyskiwane bez konieczności demontażu mechanizmu. Bazując na takich modelach, należałoby tworzyć systemy diagnozujące (*SDG*) śrub nastawnych. Z pracy wynika, że opracowanie takiego modelu diagnostycznego jest możliwe, w przypadku zastosowania statystyki i rachunku prawdopodobieństwa oraz najnowszych technologii pomiarów (układy elektronicznego przetwarzania danych, urządzenia diagnozujące, w których zastosowano czujniki wibroakustyczne, czujniki tensometryczne, czujniki termowizyjne, mierniki ciśnienia i przepływu, sztuczną inteligencję do pomiarów parametrów diagnostycznych pracy *SN* itp.).

Wykazano także, że zastosowanie w ocenie działania i tym samym stanu technicznego *SN*, metod wizualizacji i ciągłego monitoringu (trendów), w znaczny sposób ułatwia i przyspiesza podjęcie niezbędnych decyzji eksploatacyjnych.

Przedstawiono również propozycję oceny działania *SN* w ujęciu wartościującym, co umożliwiło wyrażenie jej działania liczbą z jednostką miary dzulosekunda. Określenie działania *SN* w tym sensie zostało opisane w rozdziale II. Tak rozumiane działanie *SN* umożliwia planowanie bezpiecznego rejsu, w zakresie jego długości trwania, oraz zapewnienie możliwego bezpiecznego obciążenia zarówno śruby jak też całego zespołu

napędowego. Takie ujęcie działania *SN*, w formie liczby o jednostce dzulosekunda [Js], jest rozwiązaniem nowatorskim.

Probabilistyczny model diagnostyczny *SN*, który zaproponowano w niniejszej pracy, opracowany został na podstawie śruby nastawnej f-my LIPS B.V Drunen – Holland typ: H.P.C.182, oraz zebranych przez autora danych z badań własnych prowadzonych podczas wieloletniej eksploatacji różnych typów takich pędników, analizy dostępnych orzeczeń wypadków morskich rozpatrywanych przez Odwoławczą Izbę Morską, oraz wyników badań autora przedstawianych w publikacjach i na sympozjach naukowych.

Wyżej wymienione źródła wiedzy zawierają wiele propozycji niezbędnych do tworzenia modeli diagnostycznych śrub nastawnych. Dotyczą one określenia wiarygodności i trafności diagnozy, wyodrębnienia stanów technicznych *SN*, jej stanów eksploatacyjnych oraz zależności parametrów diagnostycznych od stanów technicznych.

Dla potrzeb tworzenia racjonalnego modelu diagnostycznego *SN*, przeprowadzono identyfikację takiej śruby jako systemu diagnozowanego, oraz określono własności techniczno – eksploatacyjne, które są istotne w tym procesie. Stany techniczne *SN* przedstawiono w oparciu o kryteria pozwalające na określenie wzajemnych zależności czynników mających wpływ na poprawną pracę zespołu śruby nastawnej.

Osiągnięcie celu sformułowanego w pracy wymagało określenia i przyjęcia do opracowania modelu diagnostycznego takich stanów jak: stan zdatności s_1 , stan częściowej zdatności s_2 , i stan niezdatności s_3 . Szersza interpretacja tych stanów została przedstawiona w rozdziale III. Przeprowadzona przy tym identyfikacja śruby nastawnej umożliwiła określenie jej własności techniczno–eksploatacyjnych, a tym samym opracowanie koncepcji sterowania decyzyjnego procesem eksploatacji śruby nastawnej, w przypadku zastosowania systemu diagnostycznego tych śrub, zbudowanego na bazie zaproponowanego w tej pracy modelu diagnostycznego.

Do zrealizowania tej pracy wykorzystano również wiedzę wynikającą z dokumentacji armatorskich oraz własną z wieloletniej eksploatacji tego rodzaju urządzeń, oraz najnowsze techniki pomiarowe. Jest to bardzo istotne, gdyż wiedza ta umożliwiła dość precyzyjnie określić kryteria podziału i oceny zdatności śruby nastawnej jako systemu diagnozowanego.

Ponieważ proces eksploatacji śruby nastawnej cechuje się losowym charakterem zdarzeń należących do zbioru zdarzeń stanowiących jej proces użytkowania opracowano probabilistyczne relacje diagnostyczne odwzorowujące zbiór jej stanów technicznych w zbiór jej parametrów diagnostycznych, czyli opracowano model diagnostyczny takiej śruby. Wykazano, że w aktualnie stosowanych układach hydraulicznych *SN* zastosowanie znalazła jedynie sygnalizacja wartości krytycznych ciśnienia oleju roboczego oraz opcja załączania pompy rezerwowej oleju, w przypadku zaistnienia wartości krytycznej tego ciśnienia. Proponowany model diagnostyczny powinien być zintegrowany z systemem kontroli i nadzory pracy siłowni okrętowej.

Mając na uwadze znaczenie *SN* dla bezpieczeństwa statku, zostały opisane działania diagnostyczne, które muszą być zrealizowane, by proces użytkowania *SN* był racjonalny a podejmowane decyzji eksploatacyjne były trafne i wiarygodne. Wynikająca z tego koncepcja decyzyjnego sterowania procesem eksploatacji *SN* została zaproponowana w oparciu o dorobek statystycznej teorii decyzji. Jako kryterium wyboru optymalnej decyzji eksploatacyjnej spośród decyzji możliwych do podjęcia, przyjęto wartość oczekiwaną konsekwencji. Zgodnie z tym kryterium możliwe jest podjęcie takiej decyzji, której odpowiada największa wartość oczekiwana konsekwencji.

Materiały empiryczne potrzebne do weryfikacji opracowanego modelu diagnostycznego zostały uzyskane podczas badań, jakie autor prowadził na statkach w rzeczywistych warunkach eksploatacji, w wyniku analizy dokonanej na podstawie własnych danych uzyskanych z pomiarów, danych zgromadzonych podczas realizacji remontów oraz

informacji otrzymanych z siostrzanych statków. Najistotniejsze z nich związane bezpośrednio z pracą doktorską zostały zamieszczone w załącznikach. Było to konieczne, gdyż dotąd nie zostały one opublikowane.

Literatura:

1. Adamkiewicz A., Fydrych J.: Monitorowanie parametrów pracy jako warunek sterowania eksploatacją głównego układu napędowego statku. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie 2008
2. Adamkiewicz A., Fydrych J.: Wpływ nastaw śruby okrętowej na poprawność funkcjonowania układu ruchowego statku. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie 2009.
3. Bartnik G., Kusz A.: System wspomaganie procesów decyzyjnych w eksploatacji maszyn. Inżynieria Rolnicza 6/2005
4. Batko W.: Metodologiczne aspekty prognozowania diagnostycznego. IX Konferencja Naukowo-Techniczna. Diagnostyka Maszyn roboczych i pojazdów. ATR, Bydgoszcz 1994
5. Batko W.: Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej. Zeszyty Naukowe AGH Mechanika, z.4, Kraków 1984 nr 910
6. Batko W.: Tadusiewicz R.: Diagnostyka akustyczno-drganiowa i możliwości wykorzystania jej w badaniach niezawodności. Wibroakustyka, Kraków 1978 z.5
7. Benjamin J.R., Cornell C.A.: Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers. Wyd. polskie Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna I teoria decyzji dla inżynierów. WNT Warszawa 1077
8. Begier T., Gerlach T., Stankiewicz M.: Okrętowe maszyny i urządzenia pomocnicze. Część 1: okrętowe śruby nastawne. Wydawnictwo WSMW Gdynia 1985.
9. Benjamin J.R., Cornell C.A.: Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. WNT Warszawa 1977
10. Borkowski T., Kijewska M., Kowalak P.: Eksploatacyjna metoda analizy rozkładu obciążeń użytecznych silników napędu głównego statku. Zeszyty naukowe Nr. 5(77) Akademii Morskiej w Szczecinie. OM i UO 2005
11. Boryczko A.: Podstawy pomiarów wielkości mechanicznych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2010
12. Burnos T.: Diagnostowanie przekładni okrętowych sterów strumieniowych. Zeszyty Naukowe nr 10(82) Akademii Morskiej w Szczecinie IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo -Techniczna EXPLO-Ship 2006
13. Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. Politechnika Poznańska. KKE wrzesień 2005 CC – Diagnostyka Wibroakustyczna.
14. Ciesielski S., Górski Z.: Automatyzacja okrętowych maszyn i urządzeń pomocniczych. TRADEMAR Gdynia 2001
15. Dudziak J.: Teoria okrętu. Fundacja promocji przemysłu okrętowego i gospodarki morskiej. Wydanie II Gdańsk 2008
16. Dymarski C.: Empirical research on the sliding seals applicable to CP Propeller. Polish Maritime Research No.4 December 1996, vol.3
17. Dymarski C.: Okrętowe śruby nastawne. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2009
18. Dymarski C.: Tendencje rozwoju systemów napędu i sterowania hydraulicznego okrętowych śrub nastawnych. Materiały Konferencji Mechanika 99 Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny
19. Dziedziul K.: Probabilistyka na podstawie idei teorii niezawodności. 2009
20. Friedrich B.: Utrzymanie urządzeń i układów hydraulicznych w stanie sprawności technicznej. Sympozjum Techniczne Grupa Mannesmann Rexroth. Bielsko-Biała 1987.
21. Fydrych J.: Badania degradacji układów sterowania śrubami nastawnymi 2006 – 2009. Materiały nie publikowane.

22. Gasparski W.: Kryterium i metoda wyboru rozwiązania technicznego w ujęciu prakseometrycznym. PWN, Warszawa 1970
23. Giergiel J., Uhl T.: Identyfikacja układów mechanicznych. PWN, Warszawa 1990
24. Giergiel J., Uhl T.: Identyfikacja a diagnostyka. Zeszyty Naukowe Nr 55(77) Akademii Morskiej w Szczecinie.
25. Giernalczyk M., Herdzik J.: Analiza porównawcza zintegrowanych układów napędu. Zeszyty Naukowe nr 5(77) Akademii Morskiej w Szczecinie OMiUO 2005
26. Girtler J., Kuzmider S., Plewiński L.: Wybrane zagadnienia eksploatacji statków morskich w aspekcie bezpieczeństwa żeglugi. WSM w Szczecinie 2003
27. Girtler J., Wajand J., A.: Analiza własności modelu decyzyjnego sterowania procesem eksploatacji układów korbowo-tłokowych silnika przysposobionego do potrzeb racjonalnego sterowania procesem eksploatacji tych silników. Opracowanie naukowe wykonane w ramach projektu finansowanego przez MNiSW Nr. N N509 494638, Projekt badawczy własny pt.: „Decyzyjne sterowanie procesem eksploatacji układów korbowo-tłokowych silników napędu głównego statków morskich z zastosowaniem diagnostyki technicznej oraz uwzględnieniem bezpieczeństwa i ochrony środowiska.” Kierownik projektu prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler. Prace badawcze 18/11/PB. Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.
28. Girtler J.: Analiza i synteza sytuacji decyzyjnej w procesie eksploatacji urządzeń i systemów energetycznych. Projekt badawczy nr.06/08/PB. Politechnika Gdańska Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa. Gdańsk 2007
29. Girtler J.: Diagnostyka a sterowanie procesem eksploatacji maszyn. IX Sympozjum Techniki Wibracyjnej i Wibroakustyki. AGH, Kraków 1990
30. Girtler J.: Diagnostyka jako warunek sterowania eksploatacją okrętowych silników spalinowych. WSM w Szczecinie. 1997
31. Girtler J.: Energetyczny aspekt diagnostyki maszyn. Diagnostyka nr 1(45) 2008, Wyd. Polskie Towarzystwo Diagnostyki technicznej. Warszawa 2008
32. Girtler J.: Identyfikacja procesu diagnozowania urządzeń okrętowych. XXVII Sympozjum Siłowni Okrętowych. SymSO 2006.
33. Girtler J.: Model zmian potencjału eksploatacyjnego silnika głównego w procesie eksploatacji okrętowego zespołu napędowego. Zeszyty Naukowe AMW, Gdynia 1986 nr 4/91
34. Girtler J.: Procesy semimarkowskie jako modele procesów eksploatacji maszyn. Zebranie naukowe Komitetu Budowy Maszyn PAN, t I. Wybrane problemy eksploatacji systemów technicznych IMP. PAM, Gdańsk 1993
35. Girtler J.: Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego-grant nr 5 T 12CO1122. Praca Badawcza nr 01/05/PB Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska Gdańsk 2005
36. Girtler J.: Sterowanie procesem eksploatacji okrętowych silników spalinowych na podstawie diagnostycznego modelu decyzyjnego. Monografia. Zeszyty Naukowe AM, Gdynia 1989 nr 100A
37. Girtler J.: Wiarygodność diagnozy a podejmowanie decyzji eksploatacyjnych. Kongres Diagnostyki Technicznej KDT 96, t II, Gdańsk 1996
38. Girtler J.: Zastosowanie wiarygodności diagnozy do podejmowania decyzji w procesie eksploatacji urządzeń. Diagnostyka 2003
39. Girtler J.: Znaczenie diagnostyki technicznej w decyzyjnym sterowaniu procesem eksploatacji silników spalinowych.
40. Girtler J.: Koncepcja podejmowania decyzji z uwzględnieniem niezawodności i bezpieczeństwa morskich środków transportowych. Materiały Krajowej Konferencji

Bezpieczeństwa i Niezawodności, t.1. ITWL, Warszawa-Zakopane-Kościelisko 1999, s.289-296

41. Girtler J.: Współczynnik Gotowości obiektów technicznych w przypadku tolerowania lub nietolerowania ich uszkodzeń w czasie realizacji zadań. Materiały XXV Zimowej Szkoły Niezawodności nt. „Problemy niezawodności obiektów technicznych i tolerowanie uszkodzeń w procesie realizacji zadań” SPE KBM PAN, Warszawa-Szczyrk 1987, str.46-53
42. Górski Z., Perepeczko A., Okrętowe maszyny i urządzenia pomocnicze. Trademar Gdynia 1997
43. Grabski F.: Teoria semi-markowskich procesów eksploatacji obiektów technicznych. Zeszyty Naukowe AMW, nr 75 A, Gdynia 1982.
44. Hann M., Siemionow J., Rosochaci AW.: Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa i niezawodności obiektów górnictwa morskiego. Politechnika Szczecińska. Instytut Oceanotechniki i Okrętownictwa. Szczecin 1998
45. Jaźwiński J., Borgoń J.: Niezawodność eksploatacyjna i bezpieczeństwo lotów. WKiŁ, Warszawa 1989
46. Jelińska-Żurek N.: Analiza statystyczna metod wyznaczania liczby części zamiennych maszyn i urządzeń okrętowych. Symso 2006 XXVII Sympozjum Siłowni Okrętowych
47. Jurczak W., Schmidt J.: Badania współczesnych materiałów przeznaczonych na pędniki okrętowe. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej Rok XLX nr 2(177) 2009
48. Kaczmarek J.: Zwalczanie drgań i hałasu. Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie. Szczecin 2002
49. Kobyliński L.: Śruby okrętowe. Wydawnictwa komunikacyjne. Warszawa 1955
50. Korczewski Z.: Endoskopia silników okrętowych. AMW Gdynia 2008
51. Koronowicz T., Chaja P.: A computer system for the complete design of ship propellers. Archives of civil and mechanical engineering. Vol. VIII 2008 No.1
52. Kuliński S.: Przyczyny i rodzaje uszkodzeń śrub napędowych występujące podczas eksploatacji statku. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej „Budownictwo Okrętowe nr 65 XXV Międzynarodowe Sympozjum Siłowni Okrętowych Gdańsk 2004
53. Legutko S.: Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń. WSiP Warszawa 2007
54. Lesiak P., Świsulski D.: Komputerowa technika pomiarowa. Warszawa. Agenda Wydawnicza PAK 2002
55. Lewitowicz J.: Podstawy eksploatacji statków powietrznych. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Warszawa 2001.
56. Lipski J.: Hydrauliczne urządzenia robocze i sterowanie. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 1974
57. Lipski J.: Napędy i sterowanie hydrauliczne. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 1981
58. Łosiewicz Z.: Probabilistyczny model diagnostyczny okrętowego silnika napędu głównego. Rozprawa Doktorska Politechnika Gdańska. Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa. Gdańsk 2007
59. Magiera B.: Oleje hydrauliczne w eksploatacji urządzeń. Wydawnictwo Mobil Oil Poland Warszawa 1996
60. Marks-Wojciechowski Z.: Pacholski K., Klesza W.: Systemy pomiarowe. Łódź. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 1999
61. Monieta J., Towiański P.: Badania zdarzeń niepożądanych systemów antropotechnicznych siłowni okrętowych. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w

- Szczecinie. IV Między Narodowa Konferencja Naukowo-Techniczna EXPLO-Ship 2006.
62. Nazarko P.: Ocena stanu konstrukcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki rzeszowskiej Rzeszów 2009
 63. Niziński S., Michalski R.: Diagnostyka obiektów technicznych. Biblioteka problemów eksploatacji ITeE Radom 2002
 64. Niziński S., Żółtowski B.: Zarządzanie eksploatacją obiektów technicznych za pomocą rachunku kosztów. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie. Akademia Techniczno – Rolnicza w Bydgoszczy. Olsztyn – Bydgoszcz 2002
 65. Niziński S.: Elementy eksploatacji obiektów technicznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-mazurskiego Olsztyn 2000
 66. Niziński S., Kolator B.: Problemy współczesnej logistyki w aspekcie utrzymania ruchu obiektów technicznych. MOTROL 2007.9, 144 – 154.
 67. Osiecki A.: Hydrostatyczny napęd maszyn. Wydawnictwo Naukowo Techniczne. Warszawa 1998
 68. Pabis S.: Metodologia i metody nauk empirycznych. PWN, Warszawa 1985.
 69. Ramęda H.: Zarządzanie bezpieczeństwem statku. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny. Wydział Techniki Morskiej, ZAPOL Szczecin 2009
 70. Rudnicki J.: Assesment of operation of energy system of serial reliability structure on the example of ship main propulsion. Juornal of Polish CIMAC. Faculty of Ocean Engineering & Ship Technology. Diagnostic, Reliability and safety. Vol.3 no.2 Gdańsk 2008
 71. Schmidt J., Ławniczak A., Friedrich S.: Filtrowanie cieczy roboczych w urządzeniach hydraulicznych. Internormen 1991
 72. Skorupnik D.: Podejście wieloaspektowe do modelowania w diagnostyce technicznej. Diagnostyka 2(46) 2008 Wyd. Polskie towarzystwo Diagnostyki Technicznej Warszawa 2008
 73. Smotrycki S.: Napęd hydrostatyczny Tom I/II. Wydawnictwo naukowo Techniczne Warszawa 1955
 74. Smotrycki S.: Okrętowe napędy hydrauliczne. Wydawnictwo Morskie Gdańsk 1979
 75. Stryczek S.: Napęd hydrostatyczny Tom I/II. Wydawnictwo Naukowo Techniczne Warszawa 1995
 76. Szcześniak J., Stępnia A.: Sterowanie i eksploatacja układu napędowego statku ze śrubą nastawną. Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Szczecinie 2006
 77. Szopa T.: niezawodność i bezpieczeństwo. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2009
 78. Tomaszewski J.: Nowa koncepcja modelu diagnostycznego maszyn obrotowych. Diagnostyka 30(46) 2008
 79. Wajand J A., Wajand J T.: Tłokowe silniki Spalinowe średnio i szybkoobrotowe. Wydawnictwo naukowo-Techniczne. Warszawa 1993.
 80. Walanus A.: Statystyka w badaniu niezawodności. StatSoft. info@statsoft, WWW.statSoft.pl.StatSoft Polska 2000
 81. Więckiewicz W.: Oddziaływanie kadłuba na pracę pędnika z dyszą wylotową umieszczoną w dnie statku. Zeszyty naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie. 2008, 14(86) pp.48-52
 82. Wisniewski S.: Falowanie wiatrowe. Rozprawy i studia t. (CCCIV) 230. Uniwersytet Szczeciński. Szczecin 1998
 83. Włodarski J.: Zużycie i smarowanie maszyn okrętowych. Wydawnictwo Morskie. Gdańsk 1979
 84. Wojnowski W.: Okrętowe siłownie spalinowe. Część I Wyd. AMW, Gdynia 1997.

85. Żółtowski B., Tylicki H.: Elementy diagnostyki technicznej maszyn. Wyd. PWSZ w Piła, Piła 2008
86. Żółtowski B.: Leksykon diagnostyki technicznej. Wydanie Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996.
87. Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996.
88. Opis patentowy 129 140.: Elektro-hydrauliczny układ sterowania zespołem napędowym statku
89. Opis patentowy 95 621.: Sposób zapobiegania kawitacji i/lub erozji kawitacyjnej w tunelach śrub napędowych oraz urządzenie do zapobiegania kawitacji i/lub erozji kawitacyjnej w tunelach śrub napędowych
90. Opis patentowy 151 735.: Okrętowa śruba nastawna z piastą dzieloną w osiach skrzydeł
91. Materiały firmowe: Dokumentacja Techniczno-Ruchowa LIPS
92. Materiały firmowe: Dokumentacja Techniczno-Ruchowa KaMeWa
93. Materiały firmowe: Dokumentacja Techniczno-Ruchowa ABB Zamech
94. Przepisy Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich. Polski Rejestr Statków
95. Przepisy Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich. Germanischer Lloyd
96. Przepisy Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich. Lloyd Register of Shipping
97. Przepisy Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich. DNV
98. Materiały firmowe – NORIS
99. Materiały firmowe – Balley
100. Materiały firmowe – KIM Moland – Macon
101. Materiały firmowe – TM Master V2
102. Materiały firmowe – Norcontrol Automation AS
103. Materiały firmowe – MRS Maintenance Reporting System
104. Vademecum Hydrauliki Tom 3. Projektowania i konstruowanie układów hydraulicznych. Mannesman Rexroth - 1986
105. Cavitating-prop.jpg <http://pl.wikipedia.org/> data: 02.03.2006. Koronowicz T.: