

ZASTOSOWANIE DIAGNOSTYKI DO DECYZYJNEGO STEROWANIA PROCESEM EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ

Jerzy GIRTLEK

Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa
Katedra Siłowni Okrętowych
Politechniki Gdańskiej, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk
e-mail: jgirtl@pg.gda.pl

Streszczenie

Decyzyjne sterowanie procesem eksploatacji urządzeń technicznych należy do najistotniejszych problemów w eksploatacji tych urządzeń. Rozwiązanie tego problemu i zapewnienie racjonalnego sterowania wspomnianym procesem wymaga zastosowania diagnostyki technicznej. W artykule scharakteryzowano stochastyczną sytuację decyzyjną wynikającą z funkcjonowania tak istotnych urządzeń, jakimi są silniki spalinowe, sprężarki, pompy, kotły parowe, itp. w dowolnym systemie eksploatacyjnym i na tym tle przedstawiono propozycje zastosowania diagnostyki technicznej do sterowania procesem eksploatacji tych urządzeń.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, proces eksploatacji, sterowanie decyzyjne.

APPLICATION OF DIAGNOSTICS FOR DECISION CONTROL OVER THE PROCESS OF SYSTEMS OPERATION

Summary

Decision control of technical systems operation process is one of the most important problems in operating systems. Solving this problem and ensuring the rational control of the mentioned process demand employment of technical diagnostics. The paper provides description of a stochastic decision situation following from operating such significant systems like combustion engines, compressors, pumps, steam boilers, etc. of any operation system and on this background there are presented proposals of applying technical diagnostics for controlling the operation process of the systems.

Keywords: technical diagnostics, process of operation, decision control.

1. WSTĘP

Zastosowanie diagnostyki w fazie eksploatacji do decyzyjnego sterowania procesem eksploatacji wielu urządzeń technicznych (np. silników o zapłonie samoczynnym, turbinowych silników spalinowych, pomp, sprężarek, kotłów parowych i innych) ma szczególne znaczenie. Wynika to z dążenia ich użytkowników do utrzymania wysokiej trwałości tych urządzeń, także ich niezawodności i bezpieczeństwa działania. Zastosowanie diagnostyki technicznej umożliwia racjonalne sterowanie, czyli uporządkowane oddziaływanie użytkowników oraz urządzeń systemu sterującego (*ST*) na parametry struktury konstrukcyjnej urządzeń technicznych (jako systemów sterowanych – *STN* i zarazem diagnozowanych – *SDN*), zmierzające do uzyskania racjonalnego (a jeśli to możliwe optymalnego) przebiegu zachodzących w nich procesów (np. tarcia, zużycia) i w konsekwencji – procesów ich

eksploatacji. Sterowanie takie jest możliwe w przypadku zastosowania odpowiednich systemów diagnozujących (*SDG*), generujących sygnały niezbędne do zapewnienia ciągłości automatycznego sterowania wspomnianymi urządzeniami za pomocą odpowiednich systemów sterujących (*STR*), z uwzględnieniem sytuacji powodujących zagrożenia. Wobec tego zastosowanie diagnostyki wymaga opracowania i wdrożenia odpowiednich systemów sterowania (*ST*) i diagnostycznych (*SD*).

Każdy system sterowania (*ST*) jest wobec tego systemem składającym się z dwóch podsystemów: sterowanego (*STN*), którym jest diagnozowane urządzenie i sterującego (*STR*). Również każdy system diagnostyczny (*SD*) składa się z dwóch podsystemów: diagnozowanego (*SDN*), czyli wspomnianego urządzenia i diagnozującego (*SDG*). Wobec tego istnieje także potrzeba uwzględnienia, w procesie decyzyjnym, niezawodności systemu sterującego (*STR*) i systemu diagnozującego (*SDG*). Umożliwi to określenie wiarygodności diagnoz

generowanych przez *SDG* [3, 6]. System taki powinien być dostosowany do potrzeb identyfikacji stanów technicznych i energetycznych urządzeń jako *STN* i zarazem *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 urządzenia [3, 5].

Z rozważań tych wynika, że zastosowanie diagnostyki technicznej w decyzyjnym sterowaniu procesem eksploatacji urządzeń wymaga starannej identyfikacji tego problemu.

Ze względu na to, że silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym należą do urządzeń najbardziej rozpowszechnionych, zatem wskazane jest dokonanie takiej identyfikacji urządzeń technicznych na przykładzie tego rodzaju silników.

2. FUNKCJONOWANIE URZĄDZEŃ A DIAGNOSTYKA

Sterowanie procesem eksploatacji dowolnego urządzenia technicznego, np. silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, rozumianym podobnie jak w publikacjach [5, 6, 8], wymaga między innymi sterowania zarówno jego stanami technicznymi jak również energetycznymi w czasie eksploatacji. Sterowanie takie polega na uporządkowanym oddziaływaniu na parametry jego struktury konstrukcyjnej, 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 zarazem prognoz (*P*), 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 w formie schematu przedstawionego w pracy [3]. Każde zadanie (*Z*) należące do zbioru wspomnianych zadań może być interpretowane jako poprawne działanie (*D_Z*) urządzenia, w określonych warunkach eksploatacji (*W_R*) i w ustalonym czasie (*t*). Sterownie to powinno zapewnić racjonalną pracę urządzenia w sytuacjach zwykłych (normalnych) i szczególnych (skomplikowanych, niebezpiecznych i awaryjnych a nawet katastroficznych) [4].

Racjonalne sterowanie działaniem (pracą) dowolnego urządzenia technicznego oraz związane z nim podejmowanie decyzji eksploatacyjnych (*DE*) stosownie do istniejącego stanu technicznego i energetycznego tego urządzenia 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*), czyli określonego decydenta, a także zakłóceń systemu sterującego (*K_T*) [3]. Opracowanie koncepcji takiego sterowania jest możliwe w przypadku zastosowania statystycznej teorii decyzji bądź teorii decyzyjnych (sterowanych) procesów semimarkowskich [3, 4, 6].

Koncepcja decyzyjnego sterowania oraz uwarunkowania sprawnego sterowania (z uwzględnieniem diagnozowania) parametrami struktury konstrukcyjnej dowolnego silnika o zapłonie samoczynnym oraz procesem eksploatacji tego silnika (jako systemu sterowanego i zarazem diagnozowanego), a tym samym jego działaniem, została przedstawiona w pracy [3].

We wspomnianej koncepcji, która może być dostosowana do potrzeb sterowania procesem eksploatacji dowolnego urządzenia technicznego z uwzględnieniem diagnostyki, istotne jest uwzględnienie faktu, że sterowanie procesem eksploatacji każdego takiego urządzenia może być nieracjonalne, jeśli opracowana dla potrzeb tego sterowania diagnoza (bądź prognoza) będzie niewłaściwa. W praktyce eksploatacyjnej wielu urządzeń, podobnie jak w przypadku wspomnianych silników, istnieje zawsze określone prawdopodobieństwo zdarzenia *B* oznaczającego opracowanie niewłaściwej (błędnej) diagnozy, które można oszacować korzystając z następującego wzoru:

$$P(B) = \sum_{i=1}^4 P(A_i)P(B/A_i) \quad (1)$$

gdzie:

- B* – zdarzenie oznaczające opracowanie niewłaściwej (błędnej) diagnozy;
- A₁* – zdarzenie oznaczające uszkodzenie systemu diagnozującego (*SDG*);
- A₂* – zdarzenie oznaczające zakłócenia procesu diagnozowania, w wyniku istnienia losowych zakłóceń sterowania i zasilania urządzeń;
- A₃* – zdarzenie oznaczające zajęcie stanu urządzenia (czyli *SDN*), który nie został uwzględniony w zadaniu diagnostycznym (*ZD*);
- A₄* – zdarzenie oznaczające popełnienie błędu przez użytkownika diagnozy, np. skutek zmęczenia, nieodpowiednich jego kwalifikacji, itp.

Z rozważań tych wynika, że przy podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych powinna być uwzględniana wiarygodność diagnozy. Zagadnienie to zostało przedstawione w publikacjach [4, 6]. Konieczność dążenia do określenia wiarygodności diagnozy wynika stąd, że prawidłowo sformułowana diagnoza o stanie technicznym (np. *S*) ma formę hipotezy. Hipoteza taka jest zdaniem empirycznym zawierającym implikację syntaktyczną. W zdaniu tym, ta jego część, która poprzedza wspomnianą implikację jest prawdopodobną przyczyną

obserwowanego faktu, zawartego w części zdania następującej po tej implikacji. Faktem tym jest stwierdzenie, że obserwowany jest taki a nie inny wektor wartości parametrów diagnostycznych (np. K). Wobec tego prawidłowo sformułowana diagnoza ma (w ujęciu ogólnym) następującą treść: *urządzenie znajduje się w takim (np. S) a nie innym stanie technicznym dlatego, ponieważ obserwowany jest taki (np. K) a nie inny wektor wartości parametrów diagnostycznych*. W przypadku, gdy można stwierdzić, że podczas badania diagnostycznego urządzenia i opracowania diagnozy o jego stanie system diagnozujący (SDG) był w stanie pełnej zdatności (a więc działał niezawodnie) powinna być uwzględniana trafność diagnozy [6]. Wynika także to, że racjonalne uwzględnienie diagnostyki w procesie sterowania urządzeniami technicznymi wymaga dokonania identyfikacji diagnostycznej poszczególnych urządzeń, w wyniku której powinny zostać opracowane informacje umożliwiające skonstruowanie odpowiednich ich modeli diagnostycznych [2, 7, 8, 9, 11, 12, 13].

Wymaga także identyfikacji procesu diagnozowania, w celu uzyskania informacji określających specyfikę tego procesu. Informacje te mają istotne znaczenie, ponieważ przebieg tego procesu wpływa istotnie na wiarygodność (ewentualnie trafność) diagnozy o stanie technicznym poszczególnych urządzeń technicznych. Proces ten może być różnie postrzegany. Na podstawie dotychczasowych rozważań [1, 2, 6, 7, 10, 11, 12, 13] 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 o stanie SDN

$\{C(\mathcal{G}): \mathcal{G} \geq 0\}$. Zatem proces ten można określić następująco:

$$D(t, \mathcal{G}) = [B(t), C(\mathcal{G})]; t, \mathcal{G} \in R_+ \quad (2)$$

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);

$C(\mathcal{G})$ – 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);

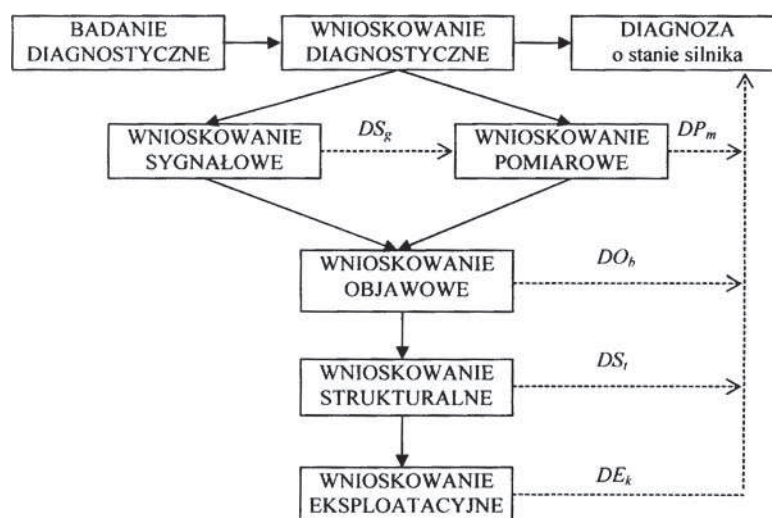
R_+ – zbiór liczb rzeczywistych nieujemnych.

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

- badanie diagnostyczne urządzenia (np. silnika),
- wnioskowanie diagnostyczne o jego stanie.

Można wyróżnić takie rodzaje wnioskowania jak: sygnałowe, pomiarowe, objawowe, strukturalne i eksploatacyjne [1]. Schemat takiego wnioskowania, np. w przypadku silnika, przedstawiono na rys. 1.

Wobec tego we wspomnianym procesie $\{C(\mathcal{G}): \mathcal{G} \geq 0\}$ można wyróżnić wartości (stany), jak badanie diagnostyczne oraz wymienione wnioskowania: sygnałowe, pomiarowe, objawowe, strukturalne i eksploatacyjne. Z kolei czas trwania tych rodzajów wnioskowania jest czasem realizacji wymienionych stanów. Zatem jest to proces klasy: dyskretny w stanach i ciągły w czasie.



Rys. 1. Schemat badania i wnioskowania diagnostycznego umożliwiającego opracowanie diagnozy o stanie technicznym dowolnego urządzenia (SDN) i tym samym podjęcia decyzji eksploatacyjnej: urządzenie (np. silnik spalinowy) „zdatne”, „częściowo zdatne”, bądź „niezdatne” do zastosowania zgodnie z przeznaczeniem; DS_g – diagnoza sygnałowa, DP_m – diagnoza pomiarowa, DO_b – diagnoza objawowa, DS_r – diagnoza strukturalna, DE_k – diagnoza eksploatacyjna

Z dotychczasowych badań wynika, że proces ten może być uznany za semimarkowski [4, 6].

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 bardziej potrzebna jest diagnoza o dużej wiarygodności. Fakty te powodują, że najczęściej rozpatrywane są trzy klasy stanów technicznych *SDN*: pełnej zdatności (s_1), częściowej (niepełnej) zdatności (s_2) oraz niezdatności (s_3).

Diagnozy o stanie *SDN* generowane przez *SDG* mogą być, ze względu na przydatność eksploatacyjną, podzielone ogólnie na użytkową i obsługową.

Diagnoza użytkowa zawiera informację o zdolności *SDN* do wykonywania zadań, natomiast diagnoza obsługowa – informację o zakresie potrzeb związanych z odnową utraconego stanu zdatności (s_1 bądź s_2).

Opracowanie wymienionych rodzajów diagnoz (wiarygodnych) wymaga zbudowania adekwatnego modelu diagnostycznego urządzenia oraz odpowiedniego do tego modelu – systemu diagnostycznego (*SD*).

Szczególne znaczenie ma wybór (ze względu na przyjęty cel badań) rodzaju modelu diagnostycznego dla poszczególnych urządzeń technicznych. Należy starannie uzasadnić w drodze wnioskowania dedukcyjnego bądź indukcyjnego czy model ten ma być stochastyczny, czy pseudo-deterministyczny, symptomowy, odwrotny, rozmyty, neuronowy, symulacyjny, czy też inny [2, 9, 11, 12, 13].

3. MODEL DIAGNOSTYCZNY URZĄDZENIA DLA POTRZEB STEROWANIA

Najistotniejszą fazą procesu tworzenia modelu diagnostycznego każdego urządzenia, z uwzględnieniem potrzeb jego sterowania jest sformułowanie zadania diagnostycznego. Najważniejszą częścią tego zadania jest opracowanie zbioru stanów urządzenia, do których rozpoznania należy dążyć w czasie jego eksploatacji. Zbiór takich stanów można opracować na podstawie informacji o uszkodzeniach urządzeń danego typu już eksploatowanych bądź urządzeń do nich podobnych. Równie ważną częścią tego zadania jest wydzielenie ze zbioru procesów wyjściowych (*PW*) urządzenia tych, które mogą być przyjęte za sygnały diagnostyczne (K^*). Następnym etapem tworzenia modelu diagnostycznego urządzenia jest wyodrębnienie spośród wielu cech sygnałów (K^*) takich, które zawierają najwięcej

informacji diagnostycznych. Te właśnie cechy, jako symptomy diagnostyczne należy następnie zweryfikować według kryteriów odwzorowania diagnostycznego (*KO*). Po takiej weryfikacji symptomy te stanowią parametry diagnostyczne (*K*). W ten sposób opracowany model diagnostyczny urządzenia może być przysposobiony do zastosowania klasycznej bądź uproszczonej (asocjacyjnej) metody diagnostycznej [3, 7, 8]. Przykładowy schemat tworzenia modelu diagnostycznego urządzenia na przykładzie silnika o zapłonie samoczynnym został przedstawiony na rys. 2.

Stosowanie uproszczonej metody diagnostycznej (asocjacyjnej) jest możliwe dlatego, ponieważ można uznać za prawdziwe następujące twierdzenie [3]:

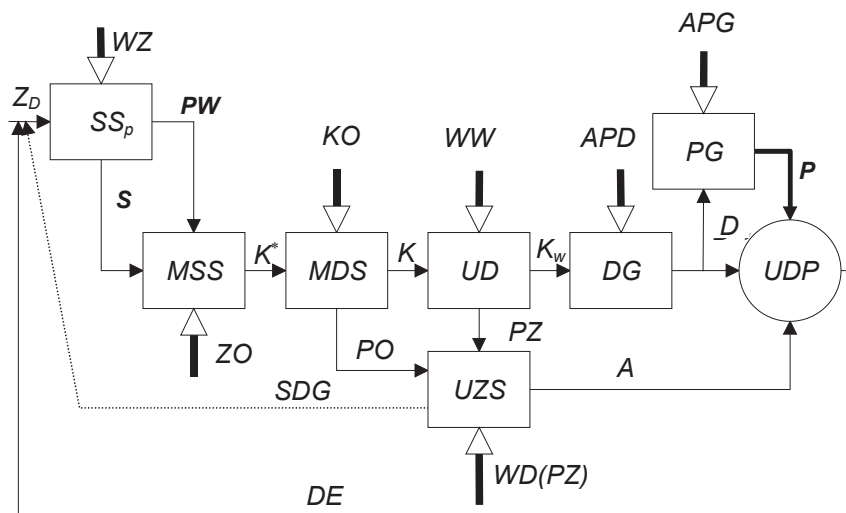
jeżeli zgodnie z przyjętym kryterium podziału stanów dowolnego urządzenia technicznego określone jego stany w dwóch różnych chwilach są sobie bliskie, to bliskie są również sygnały diagnostyczne wysyłane przez to urządzenie w tych samych dwóch chwilach.

Za sygnał diagnostyczny można uznać wektor wartości parametrów diagnostycznych, które mogą być zarejestrowane przez *UD SDG* podczas diagnozowania urządzenia jako *SDN* [3, 6, 12, 13].

Twierdzenie to, po zmodyfikowaniu umożliwiającym porównywanie stanu wielu urządzeń, można przedstawić w następującej wersji:

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

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



Rys. 2. Schemat tworzenia MDS i jego przykładowego zastosowania: ZD – zasilanie, WZ – warunki zewnętrzne, SS_p – silnik spalinowy, S – stany silnika, PW – procesy wyjściowe, MSS – model stanów silnika, ZD – zadanie diagnostyczne, K^* – sygnały diagnostyczne, MDS – model diagnostyczny silnika, 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 – diagnozera, APD – algorytmy i programy diagnozowania, APG – algorytmy i programy prognozowania, D – diagnoza, PG – prognozy, KP – kryteria prognozy, P – prognoza, UDP – użytkownik diagnozy i prognozy, UZS – układ zabezpieczeń silnika, A – sygnał alarmowy, $WD(PZ)$ – wartości dopuszczalne PZ , SDG – sterowanie obciążeniem w stanach granicznych, DE – decyzje eksploatacyjne (użytkowe i obsługowe) [3].

4. ZASTOSOWANIE DIAGNOSTYKI DO STEROWANIA PROCESEM EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ

Z rozważań przedstawionych w różnych publikacjach wynika, że niewłaściwe sterowanie procesami roboczymi urządzeń technicznych może doprowadzić do szybkich zmian parametrów ich struktury konstrukcyjnej a w rezultacie do przedwczesnych uszkodzeń elementów tych urządzeń [3, 4, 7, 12].

Zapobieganie szybkiemu zużyciu elementów dowolnego urządzenia i tym samym przedwczesnym ich uszkodzeniom jest możliwe, jeżeli będą stosowane odpowiednie obsługi profilaktyczne. Przewidywanie potrzeby wykonania takich obsług i ich racjonalne planowanie wymaga zastosowania odpowiednich systemów diagnozujących [3, 4, 8, 12, 13].

Planowanie racjonalne obsług profilaktycznych jest trudne z uwagi na to, że czynniki oddziałujące na urządzenia tak uwarunkowane, jak też nieuwarunkowane ich funkcjonowaniem mają naturę losową. Wskutek tego również własności struktury konstrukcyjnej urządzeń są wielkościami losowym (zmiennymi losowymi). W praktyce eksploatacyjnej należy się spodziewać, że każde urządzenie z danego zbioru będzie miało w tej samej chwili inny stan techniczny. Ponadto ich obciążenia cieplno-mechaniczne istniejące w czasie ich pracy będą procesami losowymi. Wynika to z tego, że obciążenia te zależą przede wszystkim od zadań,

jakie wykonuje urządzenie techniczne oraz własności otoczenia, w którym jest ono eksploatowane. Niekiedy zależą istotnie także od kwalifikacji i psychofizycznych predyspozycji użytkowników poszczególnych urządzeń. W zależności od obciążeń i początkowego stanu technicznego zmiana struktury konstrukcyjnej każdego urządzenia, w tym samym przedziale czasu, pracy będzie inna. Wynika to z tego, że zmiana stanu technicznego urządzeń jest słabo skorelowana ze czasem ich pracy do najbliższej obsługi profilaktycznej. Stąd oczywisty wniosek, że czas działania (pracy) urządzeń nie może być dobrą miarą zużycia ich struktury konstrukcyjnej. Zatem planowanie obsług profilaktycznych urządzeń technicznych po upływie stałych przedziałów czasu poprawnej pracy umożliwi wprowadzić sterowanie procesem eksploatacji tych urządzeń, ale obniża ich współczynnik gotowości technicznej oraz wskaźniki sprawności funkcjonowania [4, 5]. Zatem korzystniejsze jest sterowanie procesem obsług profilaktycznych urządzeń technicznych polegające na zastosowaniu metod realizowania tych obsług według określonego planu, ale po uprzednim zidentyfikowaniu stanów technicznych poszczególnych urządzeń za pomocą odpowiednich SDG [3, 4].

Wobec tego sterowanie działaniem urządzenia technicznego, jako systemu sterowanego (STN) i diagnozowanego (SDN), powinno być nadzorowane przez system diagnozujący (SDG), sprzężony z systemem sterującym (STR). Sprzężenie

takie umożliwił systemowi sterującemu oddziaływanie na urządzenie techniczne według diagnoz systemu diagnozującego i kształtowanie stanów energetycznych tego urządzenia w zależności od zmian jego stanu technicznego. Opracowanie systemu diagnostycznego (SD) jako SDN i SDG o odpowiednich relacjach (R) między nimi, wymaga zbudowania diagnostycznego modelu urządzenia, w którym byłyby zawarte zarówno potrzeby identyfikacji stanów technicznych i energetycznych danego urządzenia, jak również kontroli (nadzoru) funkcjonowania systemu sterującego jego pracą. Ze względu na oddziaływanie, na wszystkie wspomniane systemy, czynników destrukcyjnych, opracowane według przyjętych zasad programy i algorytmy sterowania powinny być korygowane w zależności od aktualnych stanów, w których się te systemy znajdują.

Rozpoznawanie i przewidywanie stanów technicznych i energetycznych dowolnego urządzenia, a tym samym jego procesu eksploatacji wymaga zastosowania odpowiedniego systemu diagnostycznego (SD), adekwatnego do potrzeb sterowania [1, 3, 4, 6, 12, 13]. System ten jak już wspomniano, może być określony następująco:

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

przy czym:

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

gdzie:

SD – system diagnostyczny, SDN – podsystem diagnozowany (urządzenie), SDG – podsystem diagnozujący, R – struktura SD , R_k – struktura konstrukcyjna, R_f – struktura funkcjonalna, R_n – struktura niezawodnościowa, R_d – struktura diagnostyczna.

Podsystem (system) diagnozowany SDN (urządzenie) jest przedmiotem diagnozowania (PmD), zaś podsystem (system) diagnozujący SDG składa się z podmiotu diagnozowania (PdD) oraz środków diagnozowania (SD).

Zatem system diagnozujący (SDG) może być interpretowany następująco [3]:

$$SDG = \langle PdD, \acute{S}D, R_{P\acute{S}} \rangle$$

gdzie:

$R_{P\acute{S}}$ – relacje między PdD a $\acute{S}D$, tworzące strukturę SDG (konstrukcyjną, funkcjonalną, niezawodnościową oraz diagnostyczną).

Środkami diagnozowania ($\acute{S}D$) są narzędzia diagnozy. Środki te można określić w formie zbioru:

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

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.

W tak rozumianym SDG , takie jego elementy jak: MB , TP , UD i TD powinny zapewnić wiarygodne badanie diagnostyczne urządzenia, zaś elementy: AD , DG , PG , GN – prawidłowe wnioskowanie diagnostyczne (sygnałowe, pomiarowe, objawowe, strukturalne oraz eksploatacyjne) prowadzące do sformułowania diagnozy o określonej wiarygodności.

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

Użytkowanie może być czynne (w urządzeniu zachodzi przemiana energii w formie pracy bądź ciepła) lub bierne (urządzenie oczekuje na uruchomienie). W pierwszym przypadku urządzenie znajduje się w stanie eksploatacyjnym e_1 , a w drugim – w stanie eksploatacyjnym e_2 . W czasie użytkowania aktywnego powinno istnieć dozoruwanie. Zapewnienie tej formy diagnostycznego działania może być uzyskane przez wykorzystanie w procesie wnioskowania diagnostycznego parametrów diagnostycznych ogólnych (PDG_o), które umożliwiają ustalenie, czy jest ono w stanie zdatności pełnej s_1 , czy też w stanie zdatności częściowej s_2 [3, 4]. Wtedy można skorzystać z następującej reguły oceny stanu technicznego urządzenia:

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

Oznacza to, że proces eksploatacji urządzenia $\{Y(t): t \in T\}$ może znajdować się w stanie $z_2 = (s_1, e_1)$ lub w stanie $z_3 = (s_2, e_1)$ [3, 4].

Ze względu na to, że procesowi diagnostycznemu towarzyszą różne zakłócenia [1, 3, 4, 6, 7, 12, 13] może się zdarzyć tak, że urządzenie znajdujące się w stanie s_1 zostanie uznane za będące 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 $UD\ SDG$, która umożliwia rejestrację wartości PDG_o jest uszkodzona;
- urządzenie można nadal użytkować, jeżeli nie jest potrzebna obsługa profilaktyczna ze względu na wymagania wynikające z konieczności podjęcia określonego zadania.

W przypadku, gdy istnieje potrzeba wykonania obsługi profilaktycznej, w celu dokonania odnowy stanu technicznego, urządzenie może znajdować się, w stanach: zdatności częściowej (s_2) lub niezdatności (s_3). Oba te stany implikują stan obsługi profilaktycznej (e_3). Oznacza to, że proces eksploatacji urządzenia $\{Y(t): t \geq 0\}$ 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 urządzenia 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_z) potrzebnemu do wykonania zadania, to jeżeli:

- $T_p > t_z$, można uznać, że urządzenie jest przygotowane do użytkowania;
- $T_p < t_z$, należy przyjąć, że urządzenie jest w stanie niezdatności (a więc s_3), który implikuje stan eksploatacyjny e_4 (obsługi wymuszonej przez uszkodzenie) tego urządzenia i tym samym uważać, że proces jego eksploatacji $\{Y(t): t \geq 0\}$ 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. Zatem trzeba odpowiedzieć na pytanie, czy koszt odnowy (K_o) urządzenia w systemie eksploatacji jest co najwyżej równy kosztowi dopuszczalnemu (K_D), a więc czy $K_o < K_D$. Jeśli warunek ten jest spełniony, to wykonanie obsługi tego urządzenia jest uzasadnione. W przeciwnym razie, gdy $K_o > K_D$, odnowa jest nieopłacalna, więc

powinno ono ulec kasacji (złomowaniu). W razie stwierdzenia, że obsługiwane jest uzasadnione należy doprowadzić do pełnej odnowy urządzenia. Po jej wykonaniu trzeba ponownie dokonać prognozowania jego stanu technicznego.

Z kolei, gdy urządzenie techniczne 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 przeprowadzić prognozowanie możliwości zajścia stanu s_3 . W przypadku, gdy małe jest prawdopodobieństwo zajścia tego stanu, a stan s_2 wystarczy do wykonania zadania, można urządzenie dopuścić do dalszego użytkowania. W przeciwnym razie należy ponowić działanie, które zostało opisane wcześniej.

W przedstawionej koncepcji działania należy przyjąć zasadę, że urządzenie może znajdować się w stanie eksploatacyjnym e_2 tylko wtedy, gdy jego stan techniczny może być zaliczony do stanu s_1 . Oznacza to, że wtedy proces eksploatacji urządzenia $\{Y(t): t \in T\}$ znajduje się wtedy w stanie $z_1 = (s_1, e_2)$. Realizacja tej koncepcji wymaga zastosowania systemów diagnozujących o odpowiedniej przydatności eksploatacyjnej [3, 8, 9, 11, 12, 13]. Koncepcja wykorzystania wszystkich wspomnianych form diagnostycznego działania została przedstawiona w pracy [3].

5. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Zapewnienie informacji o stanie urządzeń technicznych, niezbędnych dla potrzeb sterowania ich procesem eksploatacji wymaga wykorzystania w praktyce eksploatacyjnej wszystkich czterech form diagnostycznego działania, a mianowicie: diagnozowania, dozoru, prognozowania i genezowania. Zastosowanie tych form działania jest możliwe tylko w przypadku dysponowania w systemie eksploatacji urządzeń odpowiednim systemem diagnostycznym.

Zbudowanie systemu diagnostycznego przydatnego do racjonalnego sterowania procesem eksploatacji urządzeń technicznych wymaga z reguły opracowania ich probabilistycznego modelu diagnostycznego. Opracowanie takiego modelu jest możliwe dopiero po dokonaniu identyfikacji diagnostycznej danego typu urządzeń, w wyniku której powinno dojść do ustalenia zbioru uszkodzeń i wynikającego z niego zbiorów: stanów urządzenia, które należy rozpoznać, a także parametrów diagnostycznych oraz relacji odwzorowania zbioru wyróżnionych stanów silników w zbiór parametrów diagnostycznych i odwrotnie, z uwzględnieniem własności losowych tych relacji.

Przy opracowaniu modelu diagnostycznego urządzeń o małej liczności, na ogół brak jest informacji o uszkodzeniach i dlatego należy wykorzystywać dane dotyczące urządzeń podobnych.

W przedstawionej koncepcji zastosowania diagnostyki do sterowania procesem eksploatacji urządzeń technicznych odzwierciedlone są dwa procesy [1, 3, 6]:

- proces diagnozowania $SDN \{C(\mathcal{G}): \mathcal{G} \geq 0\}$, który stanowi przebieg następujących po sobie i powiązanych przyczynowo w czasie działań tworzących następujący łańcuch diagnostyczny: badanie diagnostyczne \rightarrow wnioskowanie diagnostyczne, które składać się może z kolejno następujących po sobie wnioskowań: sygnałowego, pomiarowego, objawowego, strukturalnego oraz eksploatacyjnego;
- proces użytkowania $SDG \{B(t): t \geq 0\}$, którego stany mogą być interpretowane następująco: stan d_1 , który oznacza użytkowanie SDG , gdy znajduje się on w stanie pełnej zdatności, stan d_2 , który oznacza użytkowanie SDG , gdy znajduje się on w stanie innym niż pełnej zdatności (czyli w stanie częściowej zdatności bądź niezdatności), stan d_3 , który oznacza użytkowanie SDG , gdy znajduje się on w stanie pełnej zdatności, lecz pojawił się stan urządzenia nie uwzględniony w zadaniu diagnostycznym [6, 11, 12].

Potrzeba wyróżnienia dodatkowo wnioskowania sygnałowego wynika stąd, że nie można pominąć wrażeń zmysłowych użytkowników urządzeń technicznych, którzy są istotnymi elementami SDG , nadzorującymi przebieg procesu diagnozowania za pomocą swoich zmysłów.

6. LITERATURA

- [1] Będkowski L.: *Elementy diagnostyki technicznej*. Wyd. 2. WAT, Warszawa 1992.
- [2] W. Cholewa, J. Kiciński: *Diagnostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne*. Monografia. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1977.
- [3] Girtler J.: *Diagnostyka jako warunek sterowania eksploatacją okrętowych silników spalinowych*. Studia Nr 28. WSM, Szczecin 1997.
- [4] Girtler J., Kuszmidler S., Plewiński L.: *Wybrane zagadnienia eksploatacji statków morskich w aspekcie bezpieczeństwa żeglugi*. Monografia. WSM, Szczecin 2003.
- [5] Girtler J., Kitowski Z., Kuriata A.: *Bezpieczeństwo okrętu na morzu. Ujęcie systemowe*. WKiŁ, Warszawa 1995.
- [6] Girtler J.: *Zastosowanie wiarygodności diagnozy do podejmowania decyzji w procesie*

eksploatacji urządzeń. Materiały V Krajowej Konferencji „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów”. Wydział Elektroniki WAT. Zakład poligraficzny „Aldan”, Warszawa 2003, s.100-109.

- [7] Michalski R.: *Diagnostyka Maszyn Roboczych*. Wyd. ITE, Radom 2004.
- [8] Niziński S.: *Eksploatacja obiektów technicznych*. Wyd. ITE. Radom 2002.
- [9] Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*. Wyd. ATR, Bydgoszcz 1996.
- [10] *Analiza ryzyka i diagnostyka procesów degradacyjnych i zmęczeniowych*. Praca zbiorowa pod redakcją S. Radcowskiego. Wyd. Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Podstaw Budowy Maszyn, 2004.
- [11] *Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań*. Praca zbiorowa pod redakcją C. Cempli i F. Tomaszewskiego. Wyd. Międzyresortowe Centrum Naukowe Majątku Trwałego. Radom 1992.
- [12] *Inżynieria diagnostyki Maszyn*. Praca zbiorowa pod redakcją B. Żółtowskiego i C. Cempla. PTDT. Wyd. ITE, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.
- [13] *Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, aerodynamicznych i magnetycznych w turbozespołach energetycznych*. Praca zbiorowa pod redakcją J. Kicińskiego. Wydział IV PAN. Wyd. IMP PAN, Gdańsk 2005.



Prof. dr hab. inż. **Jerzy GIRTLEK** jest kierownikiem Katedry Siłowni Okrętowych na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi, niezawodności, bezpieczeństwa, diagnostyki urządzeń siłowni okrętowych (ze szczególnym uwzględnieniem

silników o zapłonie samoczynnym) oraz decyzyjnego sterowania procesami eksploatacji tych urządzeń. Jest przewodniczącym Rady Naukowej kwartalnika o zasięgu międzynarodowym *Polish Maritime Research*, także przewodniczącym Zespołu Techniki Morskiej STST KT PAN i Zespołu Środowiskowego SPE KBM PAN.