

Zdzisław IDZIASZEK¹

Mechatronics and Aviation Faculty

Military University of Technology, 00-908 Warsaw 49, Kaliskiego street nr 2

zidziaszek@wat.edu.pl

Norbert GRZESIK²

Aviation Faculty

Polish Air Force Academy, 08-521 Dęblin, Dywizjonu 303 street nr 35

norbertgrzesik@op.pl

ZARYS METODY OCENY TRWAŁOŚCI I NIEZAWODNOŚCI OBIEKTU Z UWZGLĘDNIENIEM CZYNNIKA LUDZKIEGO I PŁASZCZYZNY LICZB ZESPOLONYCH

Słowa kluczowe:

Eksploatacja, zasób pracy obiektu, niezawodność, trwałość, zużycie, modelowanie, probabilistyka, logika rozmyta, efektywność, procesy destrukcyjne

Streszczenie:

W artykule dokonano wprowadzenia w istotę pojęcia tzw. potencjalnego zasobu pracy obiektu technicznego. Opisano istotne zagadnienia związane z modelowaniem zużywania zasobu pracy, na które wpływają procesy destrukcyjne od środowiska, użytkownika i obsługi. Wskazano na typowe procesy destrukcyjne i dla nich przedstawiono modele deterministyczne i probabilistyczne umożliwiające ocenę oraz prognozę zużywania potencjalnego zasobu pracy obiektu dla przyjętego poziomu niezawodności lub trwałości obiektu. Przedstawiono też zarys realizowanego przez autorów podejścia w modelowaniu zużywania zasobu pracy obiektu. Pokazano zarys modeli stanu obiektu do oceny i prognozy jego trwałości z uwzględnieniem zagadnień losowego wpływu wielu czynników wpływających na zmianę zasobu pracy obiektu, a tym samym, na jakość realizowanych zadań. W modelach uwzględniających losowość przyjęto aparat probabilistyczny oraz wykorzystano logikę rozmytą. Tak przyjęte przez autorów podejście w modelowaniu zmian niezawodności/trwałości obiektu, ma na celu lepsze przybliżenie do rzeczywistości eksploatacyjnej, a tym samym lepsze wykorzystanie ich potencjalnego zasobu pracy, przy zachowaniu założonego poziomu niezawodności/bezpieczeństwa w trakcie realizacji działania/uzyskania efektu. Na koniec pokazano nowatorskie na skalę światową podejście, pozwalające na łączenie w jednym modelu technicznych i nietechnicznych aspektów oceny i prognozy zmian jakości obiektów w eksploatacji poprzez wykorzystanie do tego celu płaszczyzny liczb zespolonych.

1 Wprowadzenie

Dla właściciela/użytkownika obiektu istotnym (i zrozumiałym intuicyjnie lepiej niż pojęcie trwałość) jest ile jego obiekt posiada potencjalnego zasobu pracy, który w trakcie eksploatacji (zwłaszcza podczas użytkowania) może zostać wykorzystany do osiągnięcia

¹ Military University of Technology, Mechatronics and Aviation Faculty, tel. 693517970, zidziaszek@wat.edu.pl

² Polish Air Force Academy, Aviation Faculty, tel. 501316162, norbertgrzesik@op.pl

określonego celu. Ważne jest również, jak i ile tego potencjału zużywa się w trakcie magazynowania, oczekiwania na realizację kolejnego zadania oraz w trakcie obsługi.

Dla zdefiniowanych jednoznacznie warunków przeznaczenia obiektu, potencjalny zasób pracy determinuje uzyskanie maksymalnej wartości trwałości dla obiektu tzn. maksymalne wykorzystanie zasobu pracy \equiv maksymalna trwałość³. Zużywanie się zasobu pracy obiektu prowadzi (na początku zwykle w sposób niejawny) do pogarszania się parametrów obiektu niezbędnych do realizacji procesu użytecznego pracy obiektu.

Istnieją dwie podstawowe strategie radzenia sobie z tym problemem. Pierwsza to realizowanie czynności prowadzących do kompensacji efektów zużywania, czyli realizacja procesu odnowy (całkowitej lub częściowej). Druga strategia to pogodzenie się z efektami zużywania i uwzględnianie ich w bieżącej ocenie i prognozie możliwości dalszego wykorzystania zasobu pracy obiektu. Obydwie strategie (ze względu na losowość wszystkich procesów mających wpływ na bieżące możliwości efektywności pracy obiektu) wymagają śledzenia/pomiaru/monitorowania procesu zużywania oraz metod oceny i prognozy wpływu tego procesu na zmniejszanie się zasobu pracy oraz na zwiększanie się prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia (zwłaszcza prowadzącego do awarii lub katastrofy). Takie podejście jest szczególnie ważne dla obiektów/systemów, gdzie priorytetem jest niezawodność i bezpieczeństwo.

To, co postrzegamy, jako nasz świat materialny ma jedną ważną cechę: niezależnie od tego czy użytkujemy obiekty techniczne⁴ czy nie, zachodzą w nich procesy destrukcyjne zmieniające ich własności. Oznacza to, że cały czas zachodzą w nich procesy prowadzące do zmniejszania się potencjalnego zasobu pracy obiektów. Dla różnych obiektów (a w ramach obiektu dla zespołów i elementów), w zależności od: zmian warunków środowiskowych, zmian intensywności użytkowania i obsługi oraz uzyskanej w trakcie wytwarzania jakości obiektu (materiałowej, konstrukcyjnej i technologicznej), zarówno tempo zmian, jak i kierunki zmian destrukcyjnych są różne. Ta zmienność może być bardzo duża; w grupie obiektów tej samej klasy (o tym samym wykorzystaniu, np. czasu pracy/liczby cykli), ale także dla pojedynczego obiektu w trakcie realizacji zadania, tj. zmiany czasu, liczby obrotów/ cyklów pracy, czy przejechanych przez obiekt kilometrów). Zmienność ta może być przyczyną mniej lub bardziej poważnych skutków, takich jak zmiana tempa zużycia obiektu, nieprzewidziane uszkodzenia powodujące przestoje w pracy, awarie lub katastrofy [4]. W przypadku dużych populacji obiektów (lub obiektów o znaczeniu strategicznym) niedoszacowanie wpływu poszczególnych zmienności parametrów obiektu, czynnika ludzkiego i środowiska, może prowadzić do znacznych strat finansowych i społecznych. Stąd przewidywanie skutków tych zmian, zabezpieczanie się przed nimi i uwzględnienie ich w planowaniu działalności gospodarczej i społecznej, jest jednym z najważniejszych zadań w analizie systemowej cyklu życia obiektu.

³ Trwałość definiowana, jako zdolność obiektu do zachowania swoich własności materiałowo-konstrukcyjnych (przy uwzględnieniu przewidzianych dla niego obsług - a w tym też wymian części) umożliwiających mu założone przez konstruktora funkcjonowanie (tj. realizację zadań, dla których został zaprojektowany).

⁴ Dalej nazywanego w skrócie obiektem.

W różnych definicjach obiektu w skład obiektu zalicza się operatorów/użytkowników lub nie. Z naszego punktu widzenia wydaje się niezbędnym traktowanie operatorów/użytkowników, jako element składowy obiektu i uwzględnianie ich wpływu na niezawodność i trwałość obiektu. Zwłaszcza, że obiekty zwykle funkcjonują w ramach większych systemów, np. systemów ich eksploatacji, gdzie ewidentnie następuje połączenie czynników typowo technicznych z czynnikiem ludzkim⁵.

Tam gdzie wykazuje się, że możliwości operatorów są niewystarczające do bezpiecznej pracy obiektu, stosuje się systemy zastępujące człowieka – operatora, czyli zwłaszcza, tam gdzie szczególnie zależy nam na unikaniu (lub ich oszacowywaniu w procesie decyzyjnym) zagrożeń. Buduje się odpowiednie modele tych procesów i wykorzystuje je do analizy rozwoju zmian destrukcyjnych dla przyjmowanych (prognozowanych) obciążeń⁶. Zagadnieniami tymi zajmuje się inżynieria bezpieczeństwa technicznego [17]. Minimalizowanie zmiennych, zakładanie typowych wartości obciążeń i przyjmowanie modeli deterministycznych (np. wpływ czynnika ludzkiego jako stały) powoduje duże uproszczenia rzeczywistości i jest przydatne tylko w warunkach, gdzie można przyjąć założenie o stacjonarności procesów w obiekcie i w otoczeniu obiektu. W większości przypadków model procesów destrukcyjnych powinien uwzględniać bardziej skomplikowane zależności z uwzględnieniem obciążeń wykraczających znacznie poza zakres normalny [13].

Poprawny model procesów destrukcyjnych powinien pokazywać słabe strony obiektu i stanowić wskazówki dla projektantów, by uwzględniali inherentne własności obiektu [4,17] prowadzące do minimalizowania negatywnych skutków w trakcie pojawiania się przeciążeń nadmiarowych (np. poprzez automatyczne wyłączanie obiektu z pracy lub włączanie systemów zabezpieczających). Do budowy takich modeli wymagane jest zastosowanie aparatu matematycznego [np. 22] umożliwiającego m in.: uwzględnienie losowości, korzystanie z cząstkowych danych z eksploatacji (systemów diagnostycznych), uwzględnienie wpływu na proces czynnika ludzkiego oraz wprowadzanie wartości granicznych procesu. Zagadnienie nie jest proste. W wielu pracach [np. 7,16,23] podejmowano próby ich realizacji, jednak, jak dotychczas są to próby ujmujące szczególne przypadki procesów destrukcyjnych. Mankamentem większości dotychczasowych modeli jest nieuwzględnianie jednocześnie w jednym modelu przyczyn mechanicznych, jak i tzw. czynnika ludzkiego mającego często decydujący wpływ na tempo zmian tych procesów destrukcyjnych, a tym samym na przedwczesne zużywanie zasobu pracy, uszkodzenia, awarie i katastrofy. Nieokreśloność/niepewność danych o obiekcie (tam, gdzie nie ma danych statystycznych) stwarza możliwość zastosowania do ich oceny logikę rozmytą. Istnieją już przykłady takich zastosowań w analizach niezawodnościowych konstrukcji, mechanicznych elementów wibracyjnych [6,24], jak również w ocenie zwiększenia niezawodności urządzeń i układów wykonawczych [25] oraz planowania obsługi narzędzi [1]. Każdy z tych modeli nie daje jednak pełnego obrazu jakości obiektu i nie informuje o wszystkich przyczynach zmian zasobu jego pracy. Dlatego

⁵ Ludzie (operatorzy/użytkownicy, obsługa itp.) mają duży rozrzut zmian swoich zachowań co powoduje wprowadzanie dużych niepewności co do zmian obciążeń/poprawności działania w cyklu życia obiektu.

⁶ W kontekście czynnika ludzkiego obciążeniem destrukcyjnym może być nieprawidłowa zmiana organizacji, zmiana poziomu wyszkolenia obsługi i użytkowników, nieuwzględniona zmiana warunków środowiska ich pracy powodująca mniejszą ich zdolność do prawidłowej pracy.

autorzy postanowili zająć się opracowaniem modelu, a następnie metody, w której wykorzystają do jego opisu teorię zbiorów rozmytych, rachunek probabilistyczny i teorię liczb zespolonych⁷.

Istotą modelu i metody ma być wykorzystanie:

- probabilistycznego modelowania zmian parametrów decydujących o technicznych i procesowych zmianach zachodzących w obiekcie (związanych z jego inherentnymi własnościami) do oceny i prognozy jakości⁸ obiektu,
- teorii zbiorów rozmytych (wnioskowania rozmytego) do opisu zmian parametrów związanych z organizacją usług, zmiennością warunków środowiskowych, zmiennością norm użycia,
- wykorzystanie płaszczyzny liczb zespolonych do opisu końcowego wskaźnika ocenowo/prognostycznego (analizie wpływu na jakość/wykorzystanie zasobu pracy obiektów/systemów zmian technicznych i nietechnicznych obiektu).

Inspiracją autorów do badań w tym zakresie jest to, że poszukiwanie coraz adekwatniejszych modeli/metod oceny i prognozy jakości obiektów/systemów jest niezbędne zwłaszcza w kontekście [4] tworzenia raportów⁹ o bezpieczeństwie. Dotyczy to zwłaszcza tego, że raport [4 str. 8] ma za zadanie wykazanie, iż zagrożenia poważnymi awariami zostały zidentyfikowane i zostały podjęte niezbędne środki w celu przeciwdziałania awariom i do ograniczania ich skutków dla ludzi i środowiska oraz, że przyjęto na etapie projektowania, budowy, eksploatacji i konserwacji każdej instalacji, właściwe rozwiązania z zakresu bezpieczeństwa i niezawodności.

2 Zarys metod oceny i prognozy wpływu pogarszania własności obiektu na możliwości realizacji zadań

Model całościowy procesu zmian zasobu pracy lub przejścia w stan niezdatności (zwłaszcza uszkodzeń prowadzących do awarii i katastrof) obiektu/systemu, powinien uwzględniać zarówno jego cechy inherentne, jak i nieinherentne.

Zmiany zasobu pracy obiektu/systemu od cech inherentnych to np.:

- liniowe lub objętościowe efekty¹⁰ zużycia materiałowego (robotycznego i starzeniowego),
- rozregulowanie (w wyniku drgań, uderzeń, itp.),
- zmiany uzyskanych pierwotnych cech (własności) obiektu/systemu, po wyprodukowaniu w wyniku procesu wdrożenia do eksploatacji,

⁷ Autorom nieznane są opracowania naukowe, w których do tego celu wykorzystano by teorię liczb zespolonych.

⁸ Poprzez wskaźniki charakterystyczne dla danego typu obiektu, rozumiemy np. niezawodnościowe, trwałościowe, gotowościowe, efektywnościowe, bezpieczeństwa, itd.

⁹ Raporty takie muszą być realizowane dla zakładów typu Seveso [16]. W przypadku nowych zakładów przed rozpoczęciem budowy lub eksploatacji, w ciągu roku od uznania, że zakład podlega przepisom dyrektywy w wyniku zmian wprowadzonych przez dyrektywę 2003/105/WE, niezwłocznie po okresowym lub niezbędnym przeglądzie, co najmniej raz na pięć lat, w przypadku modyfikacji w zakładzie, z inicjatywy operatora lub kompetentnych władz.

¹⁰ Zadziory, korozja, gradienty naprężeń temperaturowych wywołujących zmiany objętościowe/liniowe.

- podatność na zmiany parametrów w wyniku zmian zasilania (elektrycznego, hydraulicznego itp.).

Zmiany zasobu pracy obiektu/systemu od cech nieinherentnych wynikają z podatności obiektu na zmiany:

- obciążeń (z wyniku zmiany rodzaju zadania do realizacji),
- jakości użytkowania i obsługiwanego,
- parametrów charakteryzujących środowisko, itd.

co jest powodowane przez:

- zmienność norm użytkowania,
- zmienność czynnika roboczego zastosowanego w obiekcie (np. parametry materiałowe obrabianych elementów na tokarce lub typy stosowanych pocisków w broni, wartości napięcia i prądu dla urządzeń mechatronicznych i cyfrowych),
- zmianę jakości użytkowania (poprawność włączania, wyłączania, przestrzegania przyjętych norm użytkowania),
- gradienty zmienności naturalnych parametrów środowiska (temperatura – wielkość i gradient zmian w czasie, wilgotność, zapylenie/zapiaszczenie),
- narażenia wywołane sztucznie, np. reakcja obrony przeciwlotniczej lub przepięcia w sieci energetycznej wywołane włączaniem/wyłączaniem dużych odbiorników lub dostawców mocy,
- zmianę jakości obsługi (zmiana/niewłaściwy dobór strategii eksploatacji, kwalifikacji personelu, stosowanych przyrządów diagnostycznych, przestrzegania i wykonywania procedur eksploatacyjnych, zmiana stosowanych materiałów eksploatacyjnych, itp.).

Zwykle przyczyny wywołujące zmianę własności nieinherentnych są definiowane dla tak zwanych warunków normalnych/typowych nieuwzględniających rzeczywistych realiów i dla prognozowanych zmiennych warunków mogą być szacowane tylko przez ekspertów.

Natomiast własności inherentne zmieniają się w sposób losowy opisywany w postaci funkcji losowych wielu zmiennych. Z tego wszystkiego istotne są dla nas tylko te, których zmiana może być wykorzystana do pomiarów diagnostycznych i to takich, które da się realizować w bieżących obsłudze.

Zatem celem badań jest rozpoznanie własności elementów (obektu), których zmiana ma ewidentny wpływ na zmianę własności obiektu/systemu i powoduje zmianę działania obiektu (tj. ubywania potencjalnego zasobu pracy obiektu oraz/lub powodująca przechodzenie w stan niezdatności w sposób gwałtowny/katastroficzny poprzez uszkodzenia lub przerwania działania).

Wymogiem niezbędnym jest też to by można było rejestrować te zmiany, w prosty sposób w obsłudze diagnostycznych (najlepiej bieżących) oraz by dawały one ekonomicznie wymierny zysk z zastosowania w określonych realiach eksploatacyjnych.

Rejestracja zmian tych własności (przy zastosowaniu adekwatnych metod oceny i prognozy) np. takich jak:

- jakim zasobem pracy dysponuje obiekt/system w danej chwili badania (analizy możliwości jego pracy),

- jaką dla danych warunków eksploatacyjnych ma trwałość resztkową (dla nowych, jaka jest jego trwałość całkowita),
- jakie będzie prognozowane tempo zużywania się zasobu pracy (\equiv zmiana trwałości resztkowej) dla przyjmowanych - często zmiennych - warunków eksploatacyjnych (zmian norm pracy, użytkowania, środowiska itp.),
- w jakim momencie poddać obiekt obsłudze zapobiegającym uszkodzeniom (zwłaszcza tym prowadzącym do awarii czy katastrofy), czyli obsłudze przywracającym całkowicie lub w części początkowe własności obiektu,
- jakie prognozuje się (pomiędzy obsługami lub wymianami obiektu na nowy) pogarszanie własności elementów/obiektu i jak to wpływa na efektywność pracy¹¹ oraz jakie straty z tej przyczyny możemy ponieść,

umożliwia nam uzyskanie niezbędnych informacji do podejmowania właściwych decyzji zarówno eksploatacyjnych jak i projektowania strategii działania organizacji.

Reasumując poszukujemy takiego modelu obiektu/systemu, w którym na wejściu będziemy mieć parametry obiektu zmieniające się w wyniku utraty własności obiektu (zależne od jego cech inherentnych i nieinherentnych), a na wyjściu parametr pokazujący zmianę możliwości wykonywania zadań opisaną przez ocenę lub prognozę jego pozostałego potencjalnego zasobu pracy lub oszacowania zmiany prawdopodobieństwa pojawiania się uszkodzeń (zwłaszcza tych prowadzących do awarii i katastrof).

2.1 Modele procesów związanych z zasobem pracy obiektu

Metody oceny i prognozy wpływu pogarszania własności obiektu na możliwości realizacji zadań wymagają realizacji poszczególnych zadań cząstkowych:

- zamodelowania procesów związanych z zasobem pracy i przyczynami jego ubywania,
- budowy modelu matematycznego do szacowania wpływu zmian destrukcyjnych w obiekcie na zmianę zasobu pracy przy niepełnych/losowych danych, dających w efekcie rozkłady możliwych zmian zasobu pracy w funkcji wybranych parametrów diagnostycznych,
- budowy modeli przekształcających wyniki uzyskane z pomiaru i szacowania na odpowiedzi w postaci możliwych decyzji eksploatacyjnych,
- budowę modeli systemów bazodanowych automatyzujących cały proces przetwarzania danych o obiekcie na przyjęte decyzje eksploatacyjne/zarządcze.

W tej publikacji zajęto się modelowaniem procesów i budową modeli przekształcających dane o obiekcie i jego eksploatacji na prognozowany stan jego trwałości wyrażany poprzez pozostały potencjalny zasób jego pracy.

Na rys. 1. przedstawiono schematycznie reprezentatywne procesy wpływające na zmianę zasobu pracy obiektu. Zaliczono do nich własności obiektu (E.), użyteczności obiektu

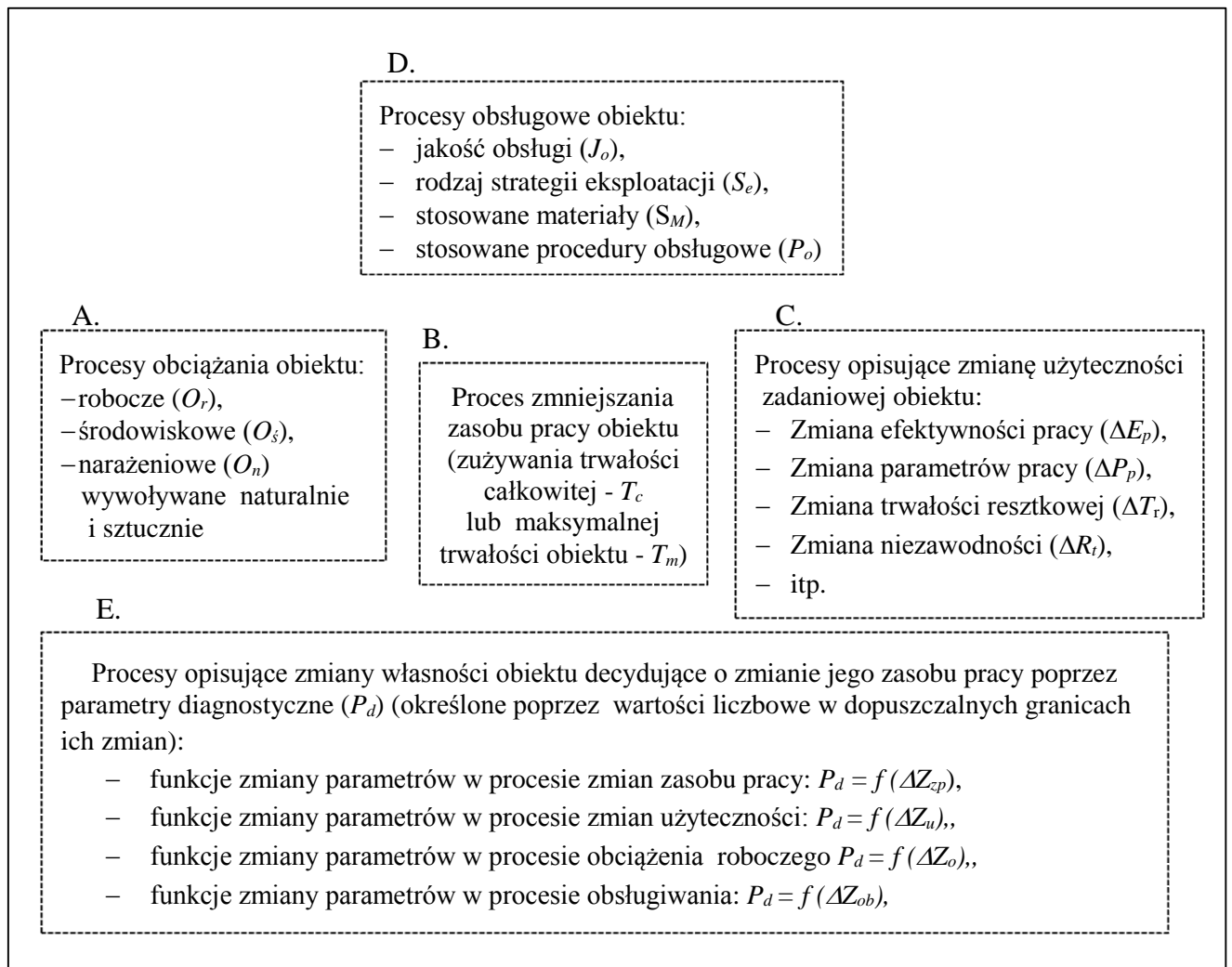
¹¹ Np. dla działka, zmniejszenie szybkostrzelności i prędkości początkowej wpływa na prawdopodobieństwo trafienia, a tym samym na prawdopodobieństwo rażenia; automat przeciwzwarciowy zaczyna się wyłączać dla maksymalnych, dopuszczalnych prądów roboczych w wyniku osłabienia sprężyny w układzie przerzucania.

(C.) - stopień zdolności do realizacji zadania, obciążenia robocze i środowiskowe (A.), a także jakości obsługi i parametrów (D.) opisujących zmianę własności w funkcji ubywania zasobu pracy (B.) oraz wpływu tego ubywania na efektywność realizowania zadania.

Można tu zastosować znany z automatyki schemat analizy wejść i wyjść z obiektu. W schemacie tym są dwa podstawowe typy:

- I. Obiekt jest traktowany jako czarna skrzynka.
- II. Uwzględniamy model obiektu za pomocą znanego nam odwzorowania np. jego struktury niezawodnościowej, funkcjonalnej.

Pierwszy model jest zwykle stosowany tam, gdzie nie mamy żadnych danych o strukturze wewnętrznej obiektu lub ta struktura jest tak skomplikowana/liczna (np. procesor), że jej analizowanie wg drugiego typu jest albo niewykonalne albo zbyt drogie. Trudność w takim podejściu tkwi w poprawnym wyborze parametrów wejściowych i wyjściowych, tj. takim ich doborze, by ich zmiana oddawała faktyczną zmianę interesujących nas własności obiektu.



Rys. 1 Reprezentatywne procesy wpływające na zmianę zasobu pracy obiektu (ΔZ_{zp})

Drugi model jest stosowany tam, gdzie zmiana wewnętrznych parametrów obiektu nie jest możliwa do zaobserwowania poprzez analizę wejść/wyjść (zaobserwowane efekty to

zacięcia i uszkodzenia), a niemonitorowanie tych zmian może prowadzić do niekontrolowanych uszkodzeń będących przyczyną awarii obiektu, a także katastrof.

Istotą w obydwu modelach jest śledzenie zmian, przekształcanie parametrów wejściowych na wyjściowe, sterowanie procesami tempa zmian parametrów wyjściowych poprzez ograniczanie zmian wejściowych i zakłócających.

2.1.1 Zarys ogólny modelu I

Zarys ogólnego modelu zmian zasobu pracy można zapisać w postaci zależności (1)

$$\Delta Z_{zp} = f(\Delta A; \Delta B; \Delta C; \Delta D; \Delta E) \quad (1)$$

w której:

ΔZ_{zp} - zmiana zasobu pracy obiektu,

$f(\Delta A; \Delta B; \Delta C; \Delta D; \Delta E)$ – funkcja przekształcająca zmiany parametrów przedstawionych na rys.1. na zmianę zasobu pracy obiektu.

$\Delta A; \Delta B; \Delta C; \Delta D; \Delta E$ – zmiany parametrów przedstawionych na rys.1.

Znając funkcje przekształceń oraz zmiany parametrów jesteśmy w stanie śledzić zmiany zasobu pracy obiektu. Gdy dysponujemy parametrami rozkładu zmian w populacji obiektów¹², to możemy na tej podstawie prognozować zmiany dla pojedynczych obiektów lub prognozować zapotrzebowanie obiektów dla różnych zadań.

Modelowanie tego typu nie umożliwi realizacji strategii wg stanu technicznego, a jedynie lepsze szacowanie resursu i tym samym wykorzystanie zasobu pracy obiektu przy realizacji strategii wg planowanej profilaktyki.

2.1.2 Zarys ogólny modelu II

Modelowanie wg II typu umożliwi realizację strategii eksploatacji wg stanu technicznego. W tym modelowaniu, modele matematyczne procesów z rys. 1. przedstawiono w postaci zbioru zależności (2÷6) dla (A, B, C, D, E).

$$A = f(O_r, O_s, O_n) \quad (2)$$

$$B = f(T_c, T_m) \quad (3)$$

$$C = f(\Delta E_p, \Delta P_p, \Delta T_r, \Delta R_t) \quad (4)$$

$$D = f(J_o, S_e, S_M, P_o) \quad (5)$$

$$E = f\{[P_d = f(\Delta Z_u)]; [P_d = f(\Delta Z_o)]; [P_d = f(\Delta Z_{ob})]\} \quad (6)$$

Istotą oceny i prognozy stanu obiektu w tych modelach jest powiązanie pomierzonych zmian fizycznych obiektu z jego obciążeniami wywołującymi te zmiany i parametrem opisującym zmiany zasobu pracy, np. liczba zrealizowanych cykli pracy, przejechanych

¹² Danego typu i w danych warunkach eksploatacyjnych.

kilometrów, czy też czas pracy obiektu. Na bazie tych zmian i przyjmowanych dopuszczalnych wartości granicznych możemy sterować cyklem życia obiektu wprowadzając go w odpowiednie stany, np. użytkowanie, obsługiwane, czy na końcu, wycofanie z eksploatacji/zmiana przeznaczenia/kasacja.

2.1.3 Podsumowanie

Modelowanie tego typu jest uproszczone poprzez przyjęcie założenia, że zmiany zachodzą w sposób deterministyczny/jednoznaczny i mamy jednorodne zarówno warunki użytkowania, jak i obciążenia środowiskowe oraz, że są nam znane wszystkie czynniki wpływające w istotny sposób na zmianę zasobu pracy obiektu. W sytuacji, gdy tych czynników jest niewiele lub istnieją czynniki dominujące, to takie podejście daje wystarczające wyniki. W innej sytuacji należy przejść na opis probabilistyczny, gdzie zamiast zdarzeń losowych operujemy zmiennymi losowymi w postaci możliwych rozkładów zdarzeń losowych.

2.2 Zarys metody wykorzystującej modele probabilistyczne

Dla obiektów złożonych (złożoność funkcjonalna i złożoność procesów zużywania się poszczególnych ich elementów) stan elementów może powodować przyjmowanie przez obiekt wiele stanów technicznych wymagających do ich opisu i poszukiwania optymalnych strategii obsługowych złożony aparat probabilistyczny [11,21,22].

Zarys tej metody jest opisany w oparciu o przedstawione w pracach model ogólny [22] i modele szczegółowe [7,23] obiektu, jakim są działka lotnicze, szybkostrzelne armaty automatyczne oraz systemy eksploatacji tych obiektów [18] i metody zarządzania, audytu, oceny trwałości i niezawodności obiektów technicznych [14].

Ze wszystkich elementów procesu eksploatacji obiektu wyodrębnia się charakteryzujące je parametry i tworzy ich przestrzenno-czasową kompozycję. Istotą badań takiej struktury jest określenie wzajemnych relacji i dopuszczalnych granic zmian poszczególnych parametrów w relacji ze zmianami innych.

Przedstawiona główna idea modelowania matematycznego oceny procesu eksploatacji obiektu technicznego oparto na następujących założeniach:

- każdy wyodrębniony element procesu eksploatacji można przedstawić w postaci zbioru parametrów,
- czynników wpływających na zmiany poszczególnych parametrów jest bardzo dużo i żaden z nich nie jest dominujący,
- zmiany wartości, przyjętych do oceny, parametrów oceniają jednoznacznie elementy poprzez określenie dopuszczalnych przedziałów zmian ich wartości w procesie eksploatacji,
- istnieje taki wynikowy parametr, który w jednoznaczny sposób określa dany element w procesie eksploatacji.

Ze względu na losowy charakter tych zmian, zaproponowano model matematyczny wykorzystujący równania różniczkowe (7) [7,22,23] opisujące dynamikę zmian stanu technicznego obiektu

$$\frac{\partial U}{\partial N} = -b_1 \frac{\partial U}{\partial Z_1} - b_2 \frac{\partial U}{\partial Z_2} - \dots - b_n \frac{\partial U}{\partial Z_n} + \frac{1}{2} \left(a_1 \frac{\partial^2 U}{\partial Z_1^2} + a_2 \frac{\partial^2 U}{\partial Z_2^2} + \dots + a_n \frac{\partial^2 U}{\partial Z_n^2} \right) \quad (7)$$

$$\begin{array}{l} \text{gdzie:} \\ b_1 = \lambda_1 h_1 \\ b_2 = \lambda_2 h_2 \\ \vdots \\ b_n = \lambda_n h_n \end{array} \quad \begin{array}{l} a_1 = \lambda_1 h_1^2 \\ a_2 = \lambda_2 h_2^2 \\ \vdots \\ a_n = \lambda_n h_n^2 \end{array}$$

W (7) współczynniki b_i oznaczają średni przyrost wartości poszczególnych parametrów na jednostkę pracy, np. liczba cykli (liczba wystrzałów od początku eksploatacji obiektu), a współczynniki a_i oznaczają średni kwadrat przyrostu wartości parametrów na jednostkę cykli pracy (w naszym przypadku N). Rozwiązanie równania (7) przyjmuje następującą postać:

$$U(Z_1, Z_2, \dots, Z_n; N) = \prod_{i=1}^n g_i(Z_i, b_i, a_i) \quad (8)$$

$$\text{gdzie:} \quad g_i(Z_i, b_i, a_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi a_i N}} e^{-\frac{(Z_i - b_i N)^2}{2a_i N}} \quad (9)$$

Rozwiązanie praktyczne można znaleźć wykorzystując estymację parametrów rozkładu prawdopodobieństwa z wykorzystaniem np. funkcji wiarygodności. I tak dla nowowprowadzanego do eksploatacji obiektu technicznego, końcowe wyrażenie umożliwiające obliczanie jego trwałości jest opisane wzorem [7,23]:

$$N_i = \left(\frac{-\alpha_i \cdot \sqrt{a_i^*} + \sqrt{4 \cdot b_i^* + \alpha_i^2 \cdot a_i^*}}{2 \cdot b_i^*} \right)^2 \quad (10)$$

gdzie: α_i – dopuszczalna wartość graniczna zmian parametru prognozującego,

N_i - oszacowana liczba cykli pracy ze względu na i -ty parametr.

Wykorzystując istotę tego modelu dla obiektu technicznego można budować modele szczegółowe pozwalające m.in. na:

- planowanie racjonalnych obsługa technicznych obiektu w powiązaniu z warunkami ich użytkowania,
- prognozowanie zapasu części zamiennych w powiązaniu z warunkami eksploatacji (obsługi i użytkowania) [7,23],
- przedłużanie ресурсu¹³ obiektu, będącego w eksploatacji [7,18,23].

2.3 Zarys metody wykorzystującej modele wnioskowania rozmytego

Metoda wykorzystująca modele wnioskowania rozmytego jest opracowana w oparciu o przedstawione w pracach modele ogólne [5,9,19,20] i szczegółowe [5,15,26] obiektów jakim są m.in. działka lotnicze, oraz systemy eksploatacji tychże obiektów, jak również metody zarządzania, audytu i oceny efektywności i niezawodności obiektów technicznych [1,6,24,25].

Za pomocą logiki rozmytej można opracować model wnioskowania rozmytego reprezentujący interesujące autorów cechy. Podstawą takiego modelu jest pojęcie kodowania rozmytego informacji. Operuje ono na zbiorach rozmytych zamiast na liczbach, co umożliwia uogólnienie informacji. Rozróżniamy dwa podstawowe modele wnioskowania rozmytego:

¹³ Wyznaczanie ресурсu poremontowego na podstawie wyznaczonej trwałości resztkowej.

- wnioskowanie nieadaptacyjne (parametry i struktura modelu, ustalone w procesie projektowania, pozostają niezmienione podczas jego działania),
- wnioskowanie adaptacyjne (parametry i struktura modelu, ustalone w procesie projektowania, ulegają zmianom podczas jego działania).

Wnioskowanie nieadaptacyjne jest prostsze niż wnioskowanie adaptacyjne, ale wymaga większej wiedzy o sterowanym obiekcie i może dawać gorsze wskaźniki działania.

Schemat modelu wnioskowania rozmytego przedstawia rys.2.



Rys. 2. Model wnioskowania rozmytego

Model wnioskowania rozmytego składa się z trzech głównych bloków (rys.3):

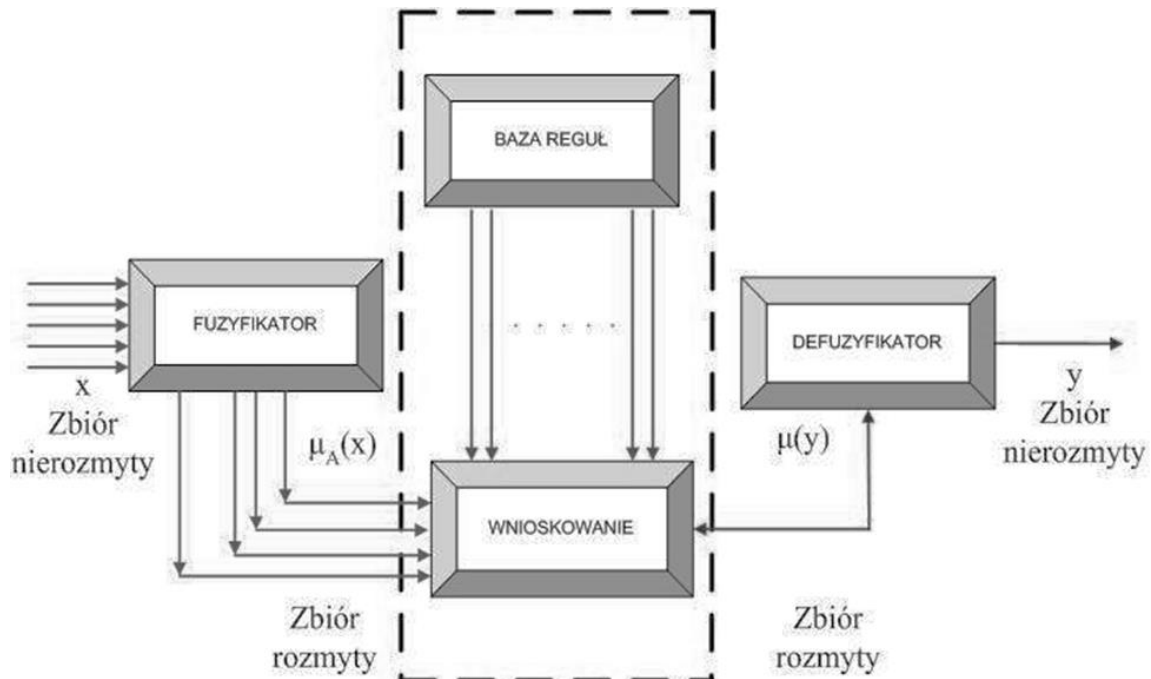
- blok rozmywania (fuzyfikacji) zwany fuzyfikatorem,
- blok wnioskowania (inferencji) z bazą reguł,
- blok wyostrania (defuzyfikacji), zwany defuzyfikatorem.

Zazwyczaj na wejście fuzyfikatora (rys.3), podane są zdeterminowane wartości (tzw. ostre: $x = x_1 \div x_n$), które podlegają zamianie na zmienne rozmyte, tj. obliczeniu funkcji przynależności $\mu(x_A)$, $A \in \{1, N\}$ dla $x_A \in X_A$. Obliczone i podane na wyjściu bloku wartości stopni przynależności informują o tym, jak wysoka jest przynależność wartości wejść x do poszczególnych zbiorów rozmytych wejść.

Blok wnioskowania (rys.3), zawiera:

- bazę reguł (główna część wiedzy o modelowanym systemie, dlatego umiejętność jej prawidłowego zaprojektowania jest bardzo ważna),
- algorytmy wnioskowania,
- funkcje przynależności zmiennej $y - \mu(y)$,

i generuje zbiór rozmyty zmiennej y . Wynikowa funkcja przynależności $\mu(y)$, ma często złożony kształt, a jej obliczenie odbywa się w drodze realizacji tzw. inferencji (wnioskowanie), które może być matematycznie zrealizowane na wiele sposobów.



Rys.3. Schemat modelu wnioskowania rozmytego z fuzyfikatorem i defuzyfikatorem

Sposoby wnioskowania mogą pochodzić z kilku źródeł:

- wiedzy eksperckiej (ekspert, na podstawie wcześniej zdobytego doświadczenia, określi sposób postępowania dla poszczególnych przypadków, które mogą się zdarzyć w trakcie procesu – zadaniem eksperta będzie wtedy konstrukcja zarówno samej reguły wnioskowania, jak i doboru funkcji przynależności dla każdego przypadku),
- modelowania jakościowego,
- algorytmów automatycznego pozyskiwania wiedzy.

Wnioskowanie na podstawie wiedzy eksperckiej bazuje na wiedzy i doświadczeniu człowieka znającego charakterystykę projektowanego systemu. Wyróżniamy wiedzę świadomą oraz podświadomą (niejawną). Wiedza świadoma cechuje się tym, że może być wyrażona słownie przez eksperta i przekazana innemu człowiekowi. Wiedzy podświadomej, w odróżnieniu od świadomej, nie można sformułować [5,19]. Wiedza ta ujawnia się w czasie praktycznej obsługi systemu (np. użycia uzbrojenia lotniczego). Przeprowadzając wywiad z ekspertem można uzyskać od niego tylko jawną część wiedzy o systemie w postaci słownych reguł określających zależności wejścia/wyjście typu:

$$\text{GDY } (x_1 \text{ jest } A_n) \text{ I } (x_2 \text{ jest } B_n) \text{ TO } (y \text{ jest } C_m), \quad (11)$$

gdzie: x_1, x_2 - wejścia systemu, y - wyjście,

A_n, B_n, C_m – zbiory rozmyte stosowane do lingwistycznej oceny wejść i wyjścia systemu przez eksperta [4].

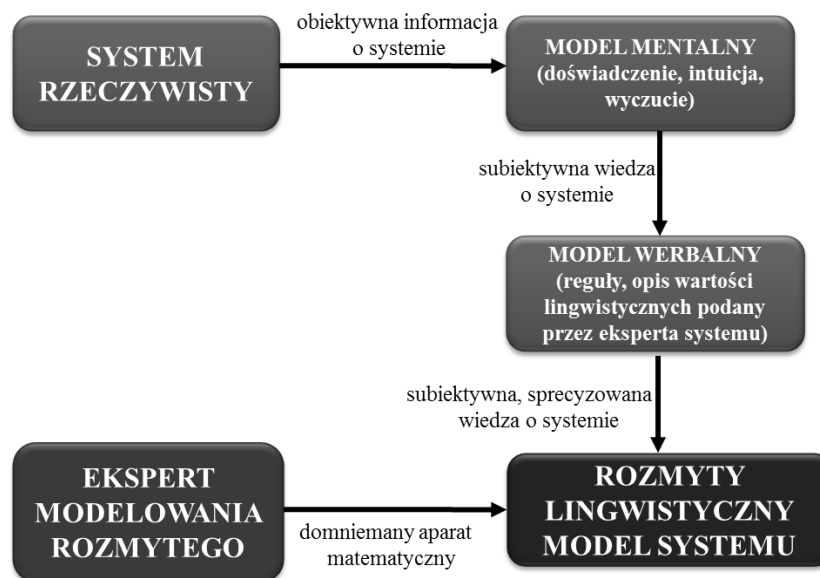
Przykładowa realizacja procesu wnioskowania (wykorzystująca regułę MODUS PONENS) przedstawiona jest w tabeli 1.

Tabela 1 Realizacja procesu wnioskowania wykorzystująca regułę MODUS PONENS

A	Uzbrojenie lotnicze o dużej skuteczności
IMPLIKACJA	Jeśli (użyjemy uzbrojenie lotnicze o dużej skuteczności) to (prawdopodobieństwo wykonania zadania bojowego większe)
B	prawdopodobieństwo wykonania zadania bojowego duże

Zbiór słownie sformułowanych reguł określających zależności wejścia/wyjścia oraz zbiór słownych informacji o wartościach lingwistycznych, jakie stosuje ekspert nazywany jest modelem werbalnym. Model werbalny jest zwykle uboższy od modelu mentalnego, bowiem nie zawiera niejawniej, podświadomej wiedzy o systemie, której ekspert nie jest w stanie przekazać [5,19]. Przepływ informacji zachodzący w procesie tworzenia rozmytego lingwistycznego modelu systemu przedstawiony jest na rys.4.

Funkcja wynikowa w defuzyfikatorze (rys.3.), podlega zamianie (wyostrzeniu) na zmienne zdeterminowane y .



Rys.4. Proces tworzenia rozmytego lingwistycznego modelu systemu rzeczywistego

Wśród wielu sposobów wyostrażania najbardziej znane to:

- metoda środka maksimum („*Middle of Maximum*” – MOM),
- metoda pierwszego maksimum („*Smallest of Maximum*” – SOM),
- metoda ostatniego maksimum („*Largest of Maximum*” – LOM),
- metoda środka ciężkości („*Center of Gravity*” – COG),
- metoda środka sum („*Center of Sums*” – COS),
- metoda wysokości („*Height Method*” – HM).

Modelowanie tego typu umożliwia ocenę i prognozowanie stanu obiektu w tych sytuacjach, gdy z braku innych możliwości musimy posilkwować się opiniami ekspertów a zwłaszcza tzw. intuicyjnymi ich aspektami wynikającymi bardziej z połączenia ich ogromnego doświadczenia z intuicją wewnętrzną w danej dziedzinie. W niektórych sytuacjach jest to jedyna, a w niektórych najefektywniejsza i najszybciej realizowana, metoda oceny

i prognozy zużywania zapasu potencjału obiektu dla określonych wstępnie warunków ich użytkowania, obsługiwania i danych warunków środowiskowych.

2.4 Model jakości eksploatacji obiektu z wykorzystaniem liczb zespolonych

Komputeryzacja i ogromny zasób wiedzy/doświadczenia w dziedzinie projektowania, wytwarzania i eksploatacji sprawia, że potrafimy coraz to lepiej określać stany zdatności i niezdatności obiektów o ile, z innych względów (ogólnie tzw. czynnika ludzkiego), nie spowodujemy sytuacji, które umożliwią zaistnienie zagrożenia bezpieczeństwa. Na potwierdzenie tej tezy istnieje coraz więcej analiz statystycznych pokazujących, że bezpieczeństwo w coraz mniejszym stopniu zależy od techniki (wprost), a coraz bardziej od czynników związanych z reakcjami/wykształceniem/samodyscypliną, ogólnie ograniczeniami ludzi. Np. w pracy [8] pokazano, że bezpieczeństwo ruchu drogowego nie zależy wprost/jednoznacznie od systemu okresowych badań samochodów, a tym samym ich stanu technicznego, a od tzw. czynnika ludzkiego¹⁴ [3]. Z uogólnionych wniosków zawartych w pracy [2] wynika, że coraz większego znaczenia w projektowaniu systemowym obiektów ma uwzględnianie ograniczeń/zagrożeń wynikających z czynnika ludzkiego, stąd też zapoczątkowanie rozwoju nowego kierunku w nauce, jakim jest inżynieria bezpieczeństwa cywilnego i technicznego.

Ujęte w publikacji opisy prowadzą do bardzo ważnego wniosku, że do dalszego uszczegółowienia analiz i badań modelowych procesu efektywnego wykorzystania potencjalnego zasobu pracy obiektu w eksploatacji, przy jednoczesnym zachowaniu założonego/przyjętego/wymaganego poziomu niezawodności lub trwałości, należy sformułować teorię pozwalającą wykazać zależności matematyczne pomiędzy technicznymi i nietechnicznymi aspektami zużywania zasobu pracy obiektu.

Aby to zrealizować proponuje się (nowatorskie na skalę światową) podejście w modelowaniu jakości eksploatacji obiektu polegające na połączeniu technicznych i nietechnicznych aspektów oceny i prognozy zmian jakości obiektów w eksploatacji poprzez wykorzystanie do tego celu płaszczyzny liczb zespolonych [10].

Uogólniony model jakościowy obiektu przedstawiono w wyrażeniu (12). Tak opisany parametr zdatności obiektu Z_u pokazuje nam jak na jego wartość wpływają zmieniające się w funkcji czasu trwałość (T) i niezawodność (N) obiektu, jako dwie podstawowe charakterystyki opisujące stan zdatności obiektu. Zaproponowany parametr Z_u jest w postaci liczby zespolonej, w której część rzeczywista określa zapas trwałości T i opisuje cechy materialne i technologiczne obiektu, a część urojona określa zapas niezawodności N i opisuje cechy obiektu związane z decyzjami ludzkimi (tzw. „czynnik ludzki”).

¹⁴ W pracy [3] wydzielono procentowy udział czynników, które były przyczyną wypadku: 96,9% to czynnik ludzki (74,4% wyłącznie ludzki), 19,9%, to przynajmniej jeden czynnik związany z drogą/środowiskiem, przy czym tylko dla 1,1% był to jedyny czynnik a tylko 4,7% czynnik związany z pojazdem, gdzie co najmniej jeden z czynników miał aspekt technicznej usterki, ale tylko 0,6% był to jedyny czynnik.

$$Z_u = T - iN \quad (12)$$

gdzie:

$Z_u = T + iN$ - oznacza uogólniony model niezawodnościowo-trwałościowy obiektu,

$T = \int_{x_p}^{x_d} \sum_{x=1}^n x_{pt}$ - oznacza zapas trwałości obiektu,

x_{pt} - dowolny diagnostyczny parametr trwałościowy,

x_p - początkowa wartość diagnostycznego parametru trwałościowego,

x_d - dopuszczalna wartość diagnostycznego parametru trwałościowego,

$N = \int_{x_p}^{x_d} \sum_{x=1}^n x_{pn}$ - oznacza zapas niezawodności, tj. wielkość nadmiaru niezawodnościowego przy

spełnianiu przez obiekt wymagań przed nim postawionych (lub zmienianych w trakcie),

x_{pn} - dowolny diagnostyczny parametr niezawodnościowy,

x_p - początkowa wartość diagnostycznego parametru niezawodnościowego.

x_d - dopuszczalna wartość diagnostycznego parametru niezawodnościowego.

Zatem, na część rzeczywistą (wyrażenia 12) wpływa zmienność czynników eksploatacyjnych, surowców, środowiska, tempa i obciążenia obiektu. Na część urojoną wpływa zmienność kompetencji człowieka – operatora i obsługującego, przyjęta strategia eksploatacji, przyjmowane procedury obsługowe i organizacyjne.

Zmienność stanów obiektu podczas eksploatacji jest zjawiskiem naturalnym. Czyli jest to proces nieuchronny. Poszczególne sytuacje eksploatacyjne (czynniki materialne i intelektualne) wpływają tylko na parametry dynamiczne tych zmian stanu. Obiekt musi być zatem widziany jako: obiekt techniczny, sytuacje eksploatacyjne, zespoły ludzkie i relacje pomiędzy nimi decydujące o dynamice zmian stanu obiektu.

Zapasy trwałości zależą głównie od:

- długości przedziałów dopuszczalnych zmian parametrów (wstępnego zapasu trwałości),
- realizowania odnów;

natomiast tempo jego ubywania od:

- możliwości realizowania obsług profilaktycznych,
- żywotności obiektu dla warunków gorszych dla niego niż to przewidział projektant,
- zmian obciążeń użytkowych, środowiskowych i materiałowych.

Natomiast zapas niezawodności zależy głównie od:

- wstępnego zapasu niezawodnościowego,
- realizowania odnów,
- nadmiaru niezawodnościowego.

Parametr niezawodnościowy może być rozpatrywany w dwóch aspektach:

- niezawodność działania dla określonych warunków zależna od odporności na uszkodzenia i od zdolności obiektu do przeciwdziałania uszkodzeniom,

- niezawodność do spełniania zmiennych wymagań użytkownika (wzrostu lub malenia jego oczekiwań zarówno dla obiektów nowych, jak i używanych – analiza wymagań dla różnych użytkowników i różnych zastosowań),

Niezawodność jest również zależna od:

- zachowania parametrów diagnostycznych w granicach dopuszczalnych,
- zachowania wymaganych wartości parametrów (przy zmianie wymagań) w granicach dotychczasowych określonych przez projektanta lub w trakcie modernizacji,
- realizowania zadania w różnej konfiguracji oczekiwań i współpracy z innymi obiektami,
- utrzymania konkurencyjności cenowej z obiektami podobnej klasy,
- bezpieczeństwa,
- ryzyka (utrata bezpieczeństwa, prognozy kosztów, opłacalności odnowy, modernizacji itp.).

Obiekt by był uznany za zdalny do użycia musi posiadać określony zapas trwałości i niezawodności. Przy braku któregośkolwiek z elementów składowych obiekt przechodzi w stan kasacji.

Wybrane przypadki szczególne modeli niezawodnościowo-trwałościowych to:

- $Z_u = T$ co oznacza, że $iN = 0$; to znaczy, że obiekt wyczerpał swój zapas niezawodności lub zostały zmienione oczekiwania względem obiektu w taki sposób, że obiekt nie ma możliwości ich spełnienia pomimo posiadania zapasu trwałości lub to znaczy, że obiekt traktuje się, jako niezawodny w całym zakresie jego zużywania T lub nie ma możliwości wpływania na jego parametry i wykorzystanie w procesie jego funkcjonowania (np. układ autonomiczny po jego uwolnieniu się z kontroli operatora, np. rakieta manewrująca typu Pershing);
- $Z_u = iN$ co oznacza, że $T = 0$; to znaczy, że obiekt spełnił swoje oczekiwania niezawodnościowe w całym zakresie życia i jego wyjście jest zgodnie z założeniami projektanta.

Gdy w rzeczywistości eksploatacyjnej $N = 0$ może to oznaczać, że decyzje ludzkie nie mają wpływu na stan obiektu (obiekt nie podlega obsłudze, zmianą norm użycia itp.) co oznacza, że model niezawodnościowo-trwałościowy zamienia się w model trwałościowy:

$$T = \int_{x_p}^{x_d} \sum_{x=1}^n x_{pt} \quad (13)$$

gdzie:

T - zapas trwałości obiektu, jako suma zapasów trwałości poszczególnych elementów obiektu opisywanych przez x_{pd} - diagnostyczne parametry trwałościowe w ich granicach zdalności (x_p do x_d),

x_{pt} - dowolny diagnostyczny parametr trwałościowy,

x_d - dopuszczalna wartość diagnostycznego parametru trwałościowego,

x_p - początkowa wartość diagnostycznego parametru trwałościowego.

$T = 0$ w przypadku, gdy wszystkie parametry osiągną stan graniczny i nie ma możliwości prowadzenia odnow.

Gdy $N = 1$ tj. obiekt jest niezawodny, czyli niezależnie od decyzji ludzkich spełnia wymagania (zwykle w określonym czasie – tak się przyjmuje dla eksploatacji wg rezerwu bez przewidywanych obsłóg). Co oznacza, że model niezawodnościowo-trwałościowy zamienia się w model niezawodnościowy:

$$N = \int_{x_p}^{x_d} \sum_{x=1}^n x_{pn} \quad (14)$$

gdzie:

$$N = \int_{x_p}^{x_d} \sum_{x=1}^n x_{pn} \text{ lub } N = \sum_{x=1}^n (x_d - x_p) \sum_{x=1}^n x_{pn} - \text{zapas niezawodności obiektu jako suma zapasów}$$

niezawodności poszczególnych elementów obiektu opisywanych przez x_{pd} - diagnostyczne parametry niezawodnościowe w ich granicach zdatności (x_p do x_d),

x_{pn} - dowolny diagnostyczny parametr niezawodnościowy,

x_d - dopuszczalna wartość diagnostycznego parametru niezawodnościowego,

x_p - początkowa wartość diagnostycznego parametru niezawodnościowego.

Modelowanie takie jest czytelne zwłaszcza, gdy rozpatruje się przypadki szczególne np. sytuacje, gdy obiekt jest jednoelementowy i nienaprawialny a o jego zdatności decyduje tylko zdolność utrzymania parametrów diagnostycznych w granicach dopuszczalnych określonych przez projektanta. Żadne decyzje późniejsze go nie dotyczą. Zatem prognozowanie zdatności obiektu uwzględnia relacje techniczno-organizacyjne i zarządcze. Modelowanie takie umożliwia śledzenie bezpośrednio na płaszczyźnie zespolonej zmian poszczególnych parametrów i optymalizację trwałości i niezawodności ze względu na dowolny parametr materialny i ludzki. Jest to o tyle istotne, że dla części parametrów zmiana ich wartości uwarunkowana jest zmianami obciążeń, które mogą wynikać zarówno z czynnika ludzkiego, jak i ze zmiany uwarunkowań technologicznych, czy też klimatycznych. Trudno tu zaklasyfikować generalnie, który z tych czynników ma w danym momencie większe znaczenie. Jednak, gdy rozpatruje się poszczególne decyzje w kontekście całościowym można zmiany śledzić w sposób ciągły. W takim przypadku zastosowanie do opisu procesu zmian w eksploatacji płaszczyzny liczb zespolonych pozwala na zapis, który nie gubi wzajemnych relacji technicznych i nietechnicznych a tym samym umożliwia śledzenie oraz wychwytywanie wszelkich wzajemnych relacji eksploatacyjnych. I tak dla pojedynczej zmiany uwarunkowań trwałościowych możemy każdorazowo zapisać zmianę wynikającą z ΔT i z ΔN łącząc je razem:

$$\Delta Z_u = \Delta T + i\Delta N \quad (15)$$

Suma zmian:

$$\sum \Delta Z_u = \sum \Delta T + i \sum \Delta N \quad (16)$$

Wyrażenie opisane wzorem (12) po uwzględnieniu zmian (16) przyjmuje postać:

$$Z_u + \sum \Delta Z_u = T + \sum \Delta T + iN + \sum \Delta N \quad (17)$$

Zatem uogólniony parametr zdatości obiektu Z_u z uwzględnieniem zmian dla i -tej chwili wynosi:

$$Z_{ui} = \frac{T + \sum \Delta T + iN + \sum \Delta N}{\sum \Delta Z_u} \quad (18)$$

Szczegółowszy opis modelu jakości eksploatacji obiektu z wykorzystaniem liczb zespolonych zostanie zrealizowany w odrębnym artykule poświęconym tylko temu zagadnieniu.

2.4.1 Implikacje praktyczne z modelu (12) i (17)

Z modeli (12) i (17) wynikają niezwykle ważne praktyczne spostrzeżenia, których z poprzednich modeli nie można było wprost wysnuć, np.:

- dwa systemy eksploatacyjne (lub dwa stany eksploatacji w tym samym systemie) są sobie równoważne, gdy $\text{Re } z_i = \text{Re } z_j$ i $\text{Im } z_i = \text{Im } z_j$, czyli, gdy stany dotyczące części materialnych systemów są sobie równe to i jednocześnie stany dotyczące elementów wynikających z czynnika ludzkiego (decyzyjnego) są sobie równe.

Taki sposób zapisu (12) pozwala nam na:

- Ocenę i prognozę, w analizie uogólnionego wskaźnika zdatości systemu, roli części materialnej i roli czynnika ludzkiego, a tym samym na ocenę czy system eksploatacji obiektu jest zrównoważony (jeśli wiemy jakie proporcje części rzeczywistej powinny być do części urojonej dla efektywnego realizowania procesu eksploatacji).
- Przyłączeniu dwóch systemów w jeden (dwóch obiektów w jeden) mamy jasny pogląd na sumaryczny wskaźnik, gdyż dołączenie nowego systemu lub obiektu może polepszyć (pogorszyć) zarówno część rzeczywistą (materialną), jak i urojoną wskaźnika. Gdy interesuje nas zysk ogólny to umożliwia to nam proste policzenie wskaźnika zysku lub straty wynikającego z tego połączenia i daje wskaźnik do oceny adekwatności zastosowanej profilaktyki w celu zrównoważenia systemu, gdyż w przypadku pogorszenia składowej części urojonej podwyższanie wskaźnika związanego z częścią rzeczywistą jest bezcelowe.
- Jeśli uogólniony parametr zdatości obiektu Z_u połączymy w relacji z możliwościami przetwórczymi lub możliwym do realizacji zyskiem organizacji to wartość tego parametru może nam wskazywać na potencjalne możliwości organizacji.
- Jeżeli z częścią urojoną skojarzymy zdolność organizacji do adaptacji na rynku (kapitał intelektualny) a część rzeczywistą z nowymi technologiami i kapitałem finansowym to możemy śledzić w ramach rozwoju przedsiębiorstwa jego zmiany potencjału i zdolności do podejmowania wyzwań na nowych rynkach, określać zapasy intelektualne do podejmowania nowych zadań, lub zapasy kapitałowe do zwiększania wielkości produkcji materialnej.

- Jeżeli potrafimy poszczególne zadania (projekty) oszacować pod kątem potrzeb poprzez uogólniony parametr zdadności obiektu Z_u to proste przekształcenia poszczególnych wskaźników w ramach przestrzeni¹⁵ (C,+) pozwoli na analizy możliwości realizacyjnych organizacji i symulacje w poszukiwaniu najefektywniejszych sposobów wykorzystania zasobów organizacji (zarówno materiałowych, jak i intelektualnych).

3 Podsumowanie

Zaproponowane podejścia do modelowania zużywania zasobu pracy obiektu a zwłaszcza do szacowania wpływu zmian własności obiektu (w wyniku zmniejszania zasobu pracy obiektu) na efektywność realizacji przez niego zadań, stanowi próbę uwzględnienia skomplikowanych zagadnień losowego wpływu wielu czynników zmniejszających zasób pracy obiektu i ich losowego wpływu na jakość realizowanych zadań. Przyjęcie w modelowaniu aparatu probabilistycznego i logiki rozmytej (przy przyjętych założeniach modelowych obiektu) wydaje się być właściwym kierunkiem badań przy opracowywaniu efektywnych i tanich sposobów rozwiązywania problemów powiązania zmiennych czynników od użytkowania, obsługi, warunków środowiska i bezpieczeństwa w praktyce eksploatacyjnej obiektów technicznych. Zakłada się, że modele tego typu umożliwią lepsze przybliżenie do rzeczywistości eksploatacyjnej, a tym samym, lepsze wykorzystanie potencjalnego zasobu pracy obiektu przy zachowaniu założonego poziomu ich niezawodności/bezpieczeństwa działania/uzyskania efektu. Wynikiem systemowych analiz metod oceny i prognozy jakości procesu eksploatacji obiektów poprzez śledzenie zmian trwałości i niezawodności w procesie ubywania potencjalnego zapasu obiektu jest zaproponowany nowatorski na skale światową model niezawodnościowo trwałościowy obiektu zapisany z wykorzystaniem liczb zespolonych.

Przedstawione w artykule zagadnienia nie wyczerpują w całości rozpatrywanych zagadnień, a jedynie pokazują obszary planowanych do realizacji przez autorów prac naukowych w tym zakresie w najbliższym czasie. Kolejne publikacje będą opisywać rozwinięcia szczegółowe w proponowanych metodach oraz pokazywać ich zastosowanie, np. do porównywania uzyskiwanych wyników, wskazywania zakresów użytkowania danych metod oraz ich implementacji w systemach bazodanowych do wspomaganie decyzyjnego zarządców/dowódców/właścicieli tychże obiektów.

Istnieje również potrzeba dookreślić zakresy stosowalności poszczególnych metod od najprostszych/szczegółowych do najogólniejszych.

Należy też dostosować proponowane modele do możliwości ich implementacji w systemach informatycznych umożliwiających realizację systemowe wspomaganie zarządzania zasobami obiektów na różnych szczeblach organizacji/przedsiębiorstwa/systemu społecznego.

¹⁵ C - przestrzeń liczb zespolonych.

4 Literatura

1. Baban M., Baban C., F., Blaga F., S. Maintenance planing of cold plastic deformation tools using fuzzy logic. *Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability* 2010; 3: 21-26.
2. Biegus A. Podstawy projektowania konstrukcji według PN-EN 1990. Materiały szkoleniowe. Poznań 2010.
3. Cuerden R W, Edwards M J, Pittman MB. Effect of Vehicle Defects in The Road Accidents. Transport Research Laboratory Published Project Report (2011).
4. Fabbri L., Struckl M., Wood M. Guidance on the Preparation of a Safety Report to Meet the Requirements of Directive 96/82/EC as Amended by Directive 2003/105/EC (Seveso II). Opublikowane przez Wspólnotowe Centrum Badawcze (Joint Research Centre) © European Communities. Luxemburg: Biuro Urzędowych Publikacji Wspólnot Europejskich 2005.
5. Grzesik N. Podstawy sterowania rozmytego. Projektowanie rozmytych systemów eksperckich w środowisku Matlab-Simulink. WSOSP. Dęblin 2012.
6. Huang H-Z. Structural reliability analysis using fuzzy sets theory. *Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability* 2012; 4: 284-294.
7. Idziaszek Z. Zarys metody oceny trwałości szybkostrzelnych armat automatycznych wykorzystującej zmiany parametrów diagnostycznych zasadniczych zespołów. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2004; Z.2: 97-109.
8. Jarosiński W. Periodic technical inspections of vehicles and road traffic safety with the number of road accidents involving fatalities. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (1): 105–111.
9. Kacprzyk J. Wieloetapowe sterowanie rozmyte. WNT. Warszawa 2001.
10. Leja F. Funkcje zespolone. Wydawnictwo naukowe PWN. Warszawa 2006. Wydanie 6.
11. Liu Y, Huang H-Z. Optimal replacement policy for multi-state system under imperfect maintenance. *IEEE Transactions on Reliability* 2010; 59.3: 483-495.
12. Miranda V. Fuzzy reliability analysis of power systems. 12-th PSCC. Dresden, August 1996.
13. Nowakowski T. Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1999.
14. Olearczuk E., Idziaszek Z. Audyt trwałości w eksploatacji szybkostrzelnych armat automatycznych z uwzględnieniem bezpieczeństwa. *Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability* 2004; 3: 15-23.
15. Orkisz M., Grzesik N. Wykorzystanie teorii zbiorów rozmytych w lotniczych układach wspomagająco – decyzyjnych w celu zwiększenia efektywności wykonania zadania lotniczego. *Journal of Aeronautica Integra* 2009; 2: 9-23.
16. Paska J. Niezawodność systemów elektroenergetycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2005.
17. Pichowicz W. Inżynieria bezpieczeństwa technicznego. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2008.

18. Piechna S, Idziaszek Z. Teoretyczne podstawy oceny trwałości eksploatacji obiektów. *Mechanik* 2010; 7: 145-152.
19. Piegat A. Modelowanie i sterowanie rozmyte. Akademska Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2003.
20. Rutkowska D., Piliński M. Rutkowski L. Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. PWN. Warszawa, Łódź 1997.
21. Soro I. W, Nourelfath M, Aït-Kadi D. Performance evaluation of multi-state degraded systems with minimal repairs and imperfect preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 2010, 95.2: 65-69.
22. Tomaszek H. Modelowanie procesów zużycia elementów mechanicznych urządzeń o obciążeniu impulsowym w aspekcie niezawodności. ITWL, Warszawa 1981.
23. Tomaszek H., Idziaszek Z. Zarys metody oceny trwałości luf działek lotniczych. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2004; Z.1: 99-110.
24. Wu W., Huang H-Z., Wang Z-L., Li Y-F., Pang Y. Reliability analysis of mechanical vibration component using fuzzy sets theory. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2012; 2: 130-134.
25. Yadav O., P., Singh N., Chinnam R., B., Goel P., S. A fuzzy logic based approach to reliability improvement estimation during product development. *Reliability Engineering and System Safety* 80 (2003) 63-74.
26. Żurek J., Grzesik N.: Fuzzy expert aircraft onboard control systems assistant. *Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon*. CRC Press/Balkema, Tylor & Francis Group (pp 250). ESREL 2013, Amsterdam, Holland, 29.09.-02.10.2013.