

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

Rozprawy
nr 86

HENRYK TYLICKI

OPTYMALIZACJA PROCESU
PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO
POJAZDÓW MECHANICZNYCH

9

icki, Henryk (1949-).
tymalizacja procesu pro

8.

BYDGOSZCZ - 1998

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

Rozprawy
nr 86

HENRYK TYLICKI

OPTYMALIZACJA PROCESU
PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO
POJAZDÓW MECHANICZNYCH

Biblioteka Główna ATR w Bydgoszczy



00000052833

BYDGOSZCZ - 1998

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
prof. dr hab. Ojcumiła Stefaniak

OPINIODAWCY

prof. dr hab. inż. Jan Adamczyk
dr hab. inż. Stanisław Niziński, prof. ART

REDAKTOR NAUKOWY

prof. dr hab. inż. Bogdan Żółtowski

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Elżbieta Rudzińska, Zbigniew Gackowski



Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy

ISSN 0209-0597

WYDAWNICTWA UCZELNIANE
AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ W BYDGOSZCZY

Wyd. I. Nakład 150 egz. Ark. aut. 5,5. Ark. druk. 6,5. Papier druk. kl. III.
Oddano do druku i druk ukończono w kwietniu 1998 r.

Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20
Zamówienie nr 4/98

SPIS TREŚCI

| | str. |
|--|-----------|
| WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ | 5 |
| WPROWADZENIE | 7 |
| ROZDZIAŁ 1 | |
| PROCES PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO | |
| POJAZDÓW MECHANICZNYCH | 9 |
| 1.1. Prognozowanie stanu technicznego pojazdów mechanicznych | 9 |
| 1.1.1. Strategia obsługiwanania pojazdów mechanicznych według stanu technicznego | 10 |
| 1.1.2. Stan techniczny pojazdów mechanicznych | 12 |
| 1.1.3. Stan i ocena wiedzy z zakresu prognozowania stanu technicznego urzędzeń | 18 |
| 1.1.4. Prognozowanie stanu technicznego zespołów pojazdów mechanicznych | 20 |
| 1.1.5. Podsumowanie i wnioski | 25 |
| 1.2. Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych | 26 |
| 1.3. Cel i zakres pracy | 30 |
| ROZDZIAŁ 2 | |
| ZAGADNIENIE WYZNACZANIA PROGNOZY STANU TECHNICZNEGO | |
| POJAZDÓW MECHANICZNYCH | 31 |
| 2.1. Wyznaczanie prognozy stanu technicznego zespołów pojazdu | 31 |
| 2.2. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych wyznaczania prognozy | 37 |
| 2.2.1. Metody wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych | 37 |
| 2.2.2. Metody prognozowania | 40 |
| 2.3. Kryteria optymalizacji | 47 |
| 2.3.1. Kryteria optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych | 48 |
| 2.3.2. Kryteria optymalizacji metod prognozowania | 50 |
| 2.4. Metoda optymalizacji wielokryterialnej | 51 |
| 2.5. Podsumowanie i wnioski | 53 |
| ROZDZIAŁ 3 | |
| OPTIMALIZACJA WYZNACZANIA PROGNOZY STANU TECHNICZNEGO | |
| POJAZDÓW MECHANICZNYCH | 54 |
| 3.1. Zadanie optymalizacyjne wyznaczania prognozy | 55 |
| 3.1.1. Zadanie optymalizacyjne wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych | 56 |
| 3.1.2. Zadanie optymalizacyjne wyboru metody prognozowania | 58 |
| 3.2. Algorytm wyznaczania optymalnej prognozy | 61 |
| 3.3. Wrażliwość optymalnej prognozy stanu technicznego | 64 |
| 3.4. Podsumowanie i wnioski | 68 |

ROZDZIAŁ 4

EGZEMPLIFIKACJA METODY WYZNACZANIA PROGNOZY STANU

| | |
|--|----|
| TECHNICZNEGO POJAZDÓW MECHANICZNYCH | 69 |
| 4.1. Opis obiektu badań | 69 |
| 4.2. Wyznaczenie optymalnej prognozy stanu technicznego dla układów i zespołów pojazdów mechanicznych | 72 |
| 4.3. Badanie zależności prognozy od „horyzontu czasowego prognozy” | 76 |
| 4.4. Badanie zależności prognozy od przebiegu pojazdu | 78 |
| 4.5. Określenie minimalnej liczby elementów szeregu czasowego do wyznaczania prognozy | 79 |
| 4.6. Badanie zależności między parametrami diagnostycznymi i cechami stanu pojazdu | 82 |
| 4.7. Podsumowanie i wnioski | 84 |

ROZDZIAŁ 5

WYKORZYSTANIE PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO

| | |
|---|----|
| W EKSPLOATACJI POJAZDÓW MECHANICZNYCH | 86 |
| PODSUMOWANIE I WNIOSKI | 93 |
| LITERATURA | 98 |

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a_j – wskaźnik wrażliwości parametru diagnostycznego
- A, B, C, D – przestrzeń ocen rozwiązań
- A^*, B^*, C^*, D^* – unormowane przestrzenie ocen rozwiązań
- c^*, d^* – punkty idealne
- c^{**}, d^{**} – unormowane punkty idealne
- c_j – wartość funkcji wagi j -tego parametru diagnostycznego
- e_j – wskaźnik zmienności j -tego parametru diagnostycznego
- $e_p(t)$ – błąd prognozy w chwili t
- F – odwzorowanie $X \rightarrow R^N$ (kryterium wektorowe)
- $F(X)$ – przestrzeń kryterialna
- $F^{-1}(C)$ – dla $C \subset A$ przeciwobraz zbioru C w dziedzinie X ,
- P – predyktor (funkcja prognozująca)
- r_σ – promień granicy przedziału błędu prognozy
- S^0 – wektor cech określających stan zdatności pojazdu
- S^1 – wektor cech określających stan niezdatności pojazdu
- T_D – dopuszczalny czas eksploatacji pojazdu
- t_b – czas badania zespołu lub układu pojazdu
- t_{b1} – termin kolejnego diagnozowania zespołu lub układu pojazdu
- t_1 – czas początku eksploatacji pojazdu
- U – zbiór parametrów stanu układu (zespołu) pojazdu
- U^2 – miara Theila
- W – zbiór stanów technicznych
- W^0 – stan zdatności
- W^1 – zbiór stanów niezdatności
- X_1, X_2 – zbiory rozwiązań dopuszczalnych
- Y_{wy} – zbiór parametrów wyjściowych
- Y – zbiór parametrów diagnostycznych
- $Y(t)$ – zbiór parametrów diagnostycznych w chwili t
- $y_{j,g}$ – wartość graniczna parametru diagnostycznego y_j
- $y_{j,n}$ – wartość nominalna (początkowa) parametru diagnostycznego y_j
- $y_{j,p}(t)$ – wartość prognozowana parametru diagnostycznego y_j w chwili t
- $y_j(t)$ – wartość j -tego parametru diagnostycznego w chwili t
- α – parametr wygładzania wykładniczego
- Δt – „krok czasowy” szeregu czasowego
- Φ_1, Φ_2 – relacje dominowania; $\Phi_1 \subset X_1 \times X_1$, $\Phi_2 \subset X_2 \times X_2$
- $\xi(t)$ – proces stochastyczny przedstawiający zmiany wartości parametru diagnostycznego
- $\mu(t)$ – funkcja trendu
- $\eta(t)$ – zakłócenie losowe
- τ – „horyzont czasowy prognozy”

WPROWADZENIE

Występujące obecnie działania racjonalizujące eksploatację majątku trwałego gospodarki narodowej obejmują między innymi projektowanie efektywnych strategii eksploatacji, zaś poszukiwanie nowych ich form jest tematem wielu prac badawczych. Jeden z przejawów tej działalności stanowi propozycja strategii obsługi urządzeń według stanu technicznego. Niezbędnym warunkiem takiej racjonalizacji w eksploatacji pojazdów mechanicznych, oprócz diagnozowania, które zapewnia informację o aktualnym stanie technicznym zespołów pojazdu, jest konieczność wyznaczenia prognozy stanu technicznego pojazdów jako terminu ich kolejnego diagnozowania.

Problemy występujące w procesie prognozowania stanu technicznego zespołów pojazdów sprowadzają się do:

1) analizy procesu pogarszania się stanu technicznego zespołów pojazdów, dekompozycji pojazdu na układy i zespoły, określenia stanów, w których może znaleźć się pojazd, określenia tendencji i dynamiki zmian wartości cech stanu zespołów pojazdów, wyboru „najlepszych” parametrów diagnostycznych,

2) wyboru „najlepszej” metody prognozowania stanu technicznego zespołów pojazdu,

3) wykorzystania informacji prognostycznej do podjęcia decyzji o terminie kolejnego diagnozowania pojazdów.

Użyte powyżej pojęcie „najlepsze” wiąże się z przyjęciem odpowiednich kryteriów i rozpatrzenie tych problemów w kategoriach poszukiwania optymalnego rozwiązania. W praktyce formułując zadanie optymalizacyjne konieczne jest posługiwanie się wieloma kryteriami oceny, co determinuje rozpatrzenie tych problemów w kategoriach rozwiązania polioptymalnego.

Celem pracy jest opracowanie metody wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego pojazdów mechanicznych.

Osiągnięcie tego celu wymaga:

- 1) przedstawienia problemów prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych,
- 2) opracowania metodyki wyznaczenia optymalnej prognozy stanu technicznego, w tym sformułowania zadania optymalizacji wielokryterialnej oraz przedstawienia schematu jego rozwiązania,
- 3) opracowania koncepcji wykorzystania optymalnej prognozy w eksploatacji pojazdów mechanicznych.

Treść pracy zawarto w pięciu rozdziałach. W pierwszym rozdziale przedstawiono problematykę prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Sprecyzowane w tym rozdziale wnioski pozwoliły ustalić problemy, które wymagają rozwiązania.

W rozdziale drugim rozpatrzono zagadnienie wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego pojazdu mechanicznego oraz określono zbiór rozwiązań dopuszczalnych i zbiór kryteriów cząstkowych funkcji kryterialnej zadania optymalizacyjnego.

W rozdziale trzecim przedstawiono rozwiązanie zadania polioptymalizacji wraz z algorytmami wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego i oceną jej wrażliwości na niektóre czynniki eksploatacyjne, charakterystyczne dla pojazdów mechanicznych.

Rozdział czwarty stanowi ilustrację aplikacyjną, zawartych w rozdziale drugim i trzecim treści, w którym na przykładzie niektórych układów i zespołów pojazdów mechanicznych zweryfikowano opracowane procedury.

W rozdziale piątym rozpatrzono koncepcję wykorzystania opracowanych w pracy procedur wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego w eksploatacji pojazdów mechanicznych.

Pracę zamykają podsumowanie i wnioski, a także perspektywy dalszych badań nad prognozowaniem stanu technicznego pojazdów mechanicznych w aspekcie możliwości ich wykorzystania w pokładowych i stacjonarnych systemach diagnostycznych pojazdów mechanicznych.

Dziedzina

Budowa i eksploatacja maszyn, diagnostyka techniczna.

Słowa kluczowe

Eksploatacja, diagnozowanie, prognozowanie, strategia obsługiwanania urządzeń technicznych według stanu technicznego, czas niezawodnej pracy urządzenia, termin kolejnego diagnozowania.

ROZDZIAŁ 1

PROCES PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO POJAZDÓW MECHANICZNYCH

1.1. Prognozowanie stanu technicznego pojazdów mechanicznych

Pojazdy mechaniczne w każdej chwili znajdują się w pewnym określonym stanie, a sekwencje czasowe tych stanów rozpatruje się jako czas istnienia pojazdów. Destrukcyjne oddziaływanie czynników eksploatacyjnych (roboczych i zewnętrznych) prowadzi do zmiany stanu pojazdów. W celu podjęcia decyzji dotyczących dalszego postępowania z pojazdami możliwe jest określenie tych stanów za pomocą metod i środków diagnostyki technicznej, co może być wykorzystane w każdej fazie istnienia pojazdów. Może to być decyzja o ich użytkowaniu, o podjęciu przedsięwzięć profilaktycznych (regulacja lub wymiana zespołów) lub wprowadzeniu zmian w czasie konstruowania i wytwarzania pojazdów. Możliwe jest to dzięki temu, że diagnostyka techniczna pozwala na udzielenie odpowiedzi na pytania:

1. Jaki jest aktualny stan badanego pojazdu?
2. Jak ocenić przeszłość pojazdu na podstawie jego aktualnego stanu?
3. Jak przewidzieć przyszłą ewolucję stanu pojazdu?

Odpowiedź na każde z tych pytań wymaga przeanalizowania zbioru zadań pojawiających się podczas opracowywania algorytmów diagnozowania.

W przypadku odpowiedzi na pytanie dotyczące przyszłej ewolucji stanu pojazdu należy podczas procesu prognozowania rozwiązać zadanie prognozowania stanu, polegające na przewidywaniu stanów pojazdu, które zaistnieją w przyszłości w chwilach $t_p > t_b$ (t_b - chwila diagnozy, t_p - jedna z chwil w przeszłości).

W odróżnieniu od klasycznego zadania diagnostycznego, którego celem jest identyfikacja aktualnego stanu pojazdu według sekwencji:

„chwilowy sygnał diagnostyczny → chwilowy stan pojazdu”

w zadaniu prognostycznym występuje sekwencja:

„historia sygnału diagnostycznego → prognozowany sygnał diagnostyczny
→ prognozowany stan pojazdu”.

Przyszłe stany pojazdu można przewidzieć opierając się na:

- diagnozie przeprowadzonej dla chwili t_b ,
- znajomości przynajmniej niektórych stanów w chwilach $t_i < t_b$, poprzedzających t_b ,
- znajomości warunków pracy pojazdu w czasie od chwili t_b do chwili t_p , której dotyczy prognoza.

Głównymi problemami pojawiającymi się przy rozwiązaniu zadania prognozowania stanu technicznego pojazdów są:

- sformułowanie celu prognozowania stanu technicznego pojazdu i określenie postaci prognozy,
- analiza zmiany stanu technicznego pojazdu w czasie eksploatacji,

- opis stanu technicznego pojazdu za pomocą cech stanu oraz współzależność pomiędzy cechami stanu i cechami sygnałów diagnostycznych,
 - analiza możliwości rozwiązania zadania prognozowania stanu.
- Problemy te stanowią przedmiot rozważań niniejszego rozdziału, zaś sformułowane wnioski powinny ustalić problemy wymagające rozwiązania.

1.1.1. Strategia obsługiwanania pojazdów mechanicznych według stanu technicznego

Proces prognozowania stanu pojazdów obejmuje czynności zmierzające do oszacowania prawdopodobnego stanu pojazdów w przyszłości, stąd zakres tych czynności związany jest ściśle z przyjętym celem prognozowania.

W przedstawianym opracowaniu cel prognozowania związany jest z obsługiwaniem pojazdów, które jest jednym z elementów ich eksploatacji. Obsługiwanie obejmuje zbiór działań mających na celu podtrzymanie stanu zdadności układów i zespołów pojazdów lub doprowadzenie ich do stanu zapewniającego wykonanie zadań pojazdu zgodnie z przeznaczeniem.

Zgodnie z tym, co wykazano w pracy [64] i co potwierdziły badania, w których uczestniczył autor [42,66], można stwierdzić, że stosowana jeszcze planowo-zapobiegawcza strategia obsługiwanania pojazdów stwarza wprawdzie warunki właściwego sterowania eksploatacją pojazdów, ale brak efektywnej miary eksploatacji czyni tę metodę mało doskonałą. Wynika to z faktu, że przebieg pojazdu wyrażony w kilometrach lub praca pojazdu wyrażona w motogodzinach, stanowiące podstawę planowania obsługiwanania, są niekiedy nie związane, np. ze względu na warunki pracy, z rzeczywistym stanem technicznym pojazdów.

Podobnie jest z planowo - zapobiegawczą strategią obsługiwanania z diagnozowaniem, jest to bowiem tylko pewna modyfikacja poprzedniej strategii. Wykorzystuje ona opracowania uwzględniające rozwój metod i środków diagnostycznych, ale nie wyczerpuje możliwości optymalizacji procesu obsługiwanania pojazdu, który powinien wynikać z warunku potrzeby obsługiwanania, co wymaga ustalenia chwilowego stanu technicznego pojazdu i prognozowania jego zmian.

Przedstawiona w pracach [64,65] koncepcja obsługiwanania według stanu technicznego, będąca elementem strategii eksploatacji według stanu, spełnia warunek potrzeby obsługiwanania (rys.1.1).

Idea tej koncepcji sprowadza się do badań i oceny stanu technicznego, ustalenia przyczyn zaistniałego stanu i przewidywania rozwoju jego zmian. Po przyjęciu pojazdu z podsystemu użytkowania (niekiedy pojazd jest diagnozowany w czasie użytkowania) poddawany jest on diagnozowaniu za pomocą programu diagnostycznego PD. W przypadku stwierdzenia niezdatności następuje ustalenie jej przyczyny, usunięcie niezdatności (regulacja lub wymiana zespołu) i pojazd ponownie jest diagnozowany.

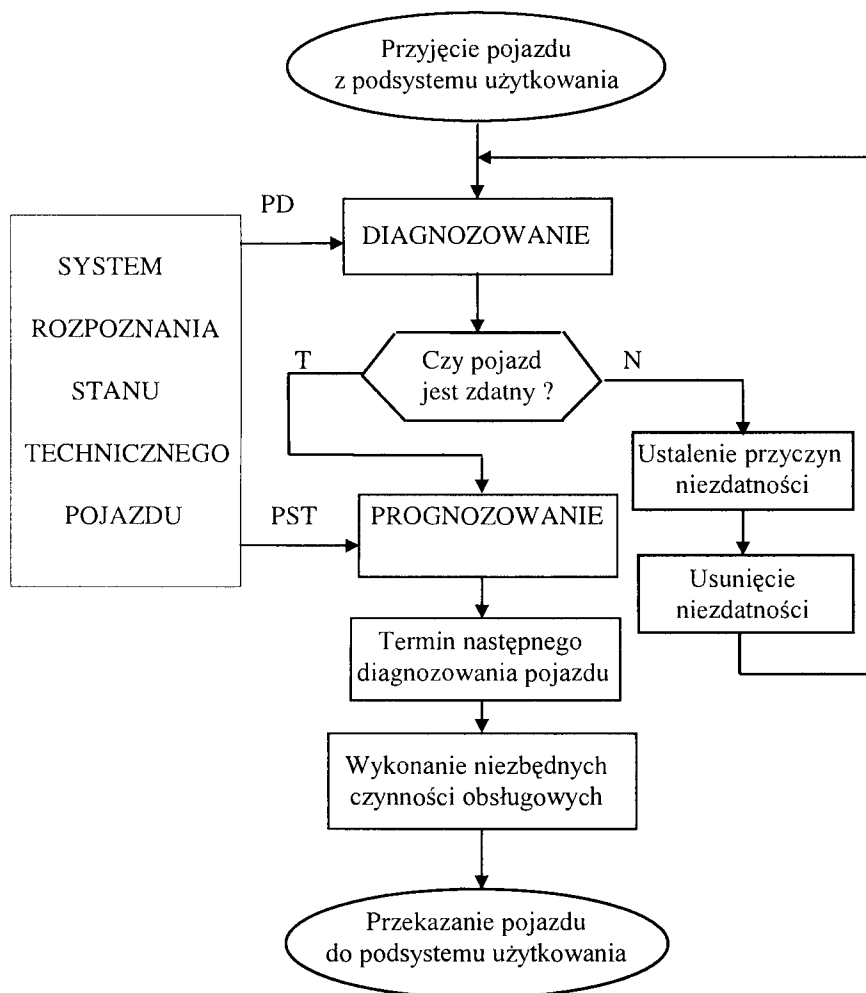
W przypadku stwierdzenia zdadności, w wyniku realizacji procesu prognozowania, wyznacza się termin następnego diagnozowania pojazdu.

Strategia ta zapewnia więc:

- a) aktualną ocenę stanu technicznego pojazdu, co stanowi podstawę do ustalenia następnego terminu diagnozowania,
- b) eliminację niezdatnych pojazdów z podsystemu użytkowania.

W odróżnieniu od istniejącej cyklicznej strategii planowo - zapobiegawczej przedstawiona metoda jest więc strategią sekwencyjną, polegającą na przeprowadzeniu obsługiwań wynikowych, w której termin następnego diagnozowania wyznaczany jest w wyniku realizacji procesu prognozowania.

Celem procesu prognozowania jest więc wyznaczenie wartości przebiegu pojazdu, po którym ma nastąpić, w myśl schematu obsługiwań (rys.1.1), diagnozowanie pojazdu. Wielkość ta, jako termin następnego diagnozowania pojazdu, powinna więc zostać wygenerowana przez proces prognozowania jako prognoza stanu technicznego (PST) pojazdu, co stanowi cel prognozowania stanu technicznego pojazdów i określa jednocześnie postać prognozy.



Rys. 1.1. Schemat obsługiwań pojazdów mechanicznych według stanu technicznego

Zadaniem, wynikającym z tak postawionego celu prognozowania, jest opracowanie metody umożliwiającej, w wyniku realizacji procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów, wyznaczenie terminu następnego diagnozowania pojazdów mechanicznych.

1.1.2. Stan techniczny pojazdów mechanicznych

Podczas eksploatacji w zespołach pojazdów zachodzą różnorodne procesy zużyciowe i starzeniowe. Przebieg zużycia zespołów pojazdów w czasie eksploatacji zależy od tego, który z procesów zużycia jest dominujący. I tak dla wszystkich zespołów pojazdów, w których występuje tarcie ślizgowe, wyróżnia się zazwyczaj trzy okresy przebiegu zużycia (okres starzenia wstępnego, okres zużycia normalnego, okres zużycia przyspieszonego).

Okres starzenia wstępnego jest początkowym okresem współpracy elementów, w którym następuje przekształcenie początkowego stanu warstw wierzchnich docieranych elementów (np. czopu wału korbowego - panewki łożyska) w stan optymalny charakteryzujący się zwiększoną odpornością na zużycie skojarzenia tych elementów.

Okres drugi charakteryzuje się stałą intensywnością zużycia, która zależy przede wszystkim od czynników eksploatacyjnych, w mniejszym stopniu zaś od czynników konstrukcyjnych i technologicznych.

W okresie trzecim następuje przyspieszone zużycie elementów, co oznacza, że zostały przekroczone dopuszczalne luzy skojarzeń współpracujących elementów. Wskutek tego występują dodatkowe obciążenia dynamiczne wywołujące bardziej intensywne odkształcenia elementów, następują zaburzenia w smarowaniu skojarzeń (w większym stopniu występuje tarcie mieszane z większym udziałem tarcia suchego, a nawet suche), pojawiają się większe ubytki materiału i rośnie chropowatość powierzchni, co w końcu może prowadzić do awarii zespołów.

Dla zespołów pracujących przy tarcu tocznym (np. łożysk tocznych) charakterystyczne są dwa okresy zużycia. W okresie starzenia wstępnego zużycie jest niezauważalne. W okresie drugim zużycie będzie nieznaczne, spowodowane jest ono bowiem nie ubytkiem materiału, a zgniotem warstwy wierzchniej. W okresie tym narastają jednak zmiany zmęczeniowe spowodowane cyklicznym oddziaływaniem naprężeń w warstwach wierzchnich skojarzonych elementów tocznych, co prowadzi do ich przyspieszonego zużycia.

Podobny przebieg zużycia, według autora, charakterystyczny jest dla urządzeń elektrycznych pojazdów (np. prądnicy, rozrusznika), przy czym obok zużycia mechanicznego występuje erozja elektryczna, która znacznie intensyfikuje ubytek masowy materiału zespołów (np. szczotek, komutatora, styków przekaźnika).

Specyficzny przebieg zużycia występuje w przypadku akumulatora, w którym zachodzą nieodwracalne zmiany chemiczne powodujące utratę jego własności użytkowych, zaś przebieg zużycia, przez analogię, można przedstawić jako okres zużycia normalnego.

Z powodu występowania różnorodnych przyczyn uszkodzeń zespołów pojazdów intensywność występowania tych uszkodzeń w toku eksploatacji jest różna i można ją związać z przedstawionymi etapami eksploatacji pojazdów.

W okresie starzenia wstępnego występuje znaczna intensywność uszkodzeń, powodowana ukrytymi wadami materiałowymi, błędami wytwarzania (szczególnie montażu) oraz błędami w czasie transportu i podczas przechowywania.

Okres normalnej eksploatacji charakteryzuje się obniżonym i w przybliżeniu ustabilizowanym poziomem intensywności uszkodzeń.

W okresie zużyć przyspieszonych stopniowo narasta intensywność uszkodzeń, spowodowana sumowaniem się różnych przyczyn uszkodzeń oraz gwałtownym zużyciem zespołów pojazdów.

Ponadto na wszystkich etapach istnienia pojazdów występuje różnego rodzaju przypadkowość, szczególnie to dotyczy wytwarzania i eksploatacji pojazdów. W ramach danej klasy pojazdów (marki i typu), pomimo wymagań wprowadzanego obecnie systemu jakości (normy ISO 9001-9003 [74]) istnieje przypadkowy rozrzut wymiarów i własności fizycznych (sprężystości, plastyczności, twardości, zdolności tłumienia drgań, składu fizykochemicznego, własności warstw wierzchnich). Podobną przypadkowość można zaobserwować podczas montażu współpracujących elementów w jedną funkcjonalną całość. Pomimo starannego doboru i kojarzenia par obrotowych, suwliwych i połączeń stałych nieuniknione są przypadkowe odstępstwa od idealnego procesu montażu.

W związku z tym analiza pojazdów tego samego typu wykaze przypadkowość ich własności geometryczno-mechanicznych, powodujących rozrzut procesów dynamicznych zachodzących w zespołach pojazdów. Zmiany te, w połączeniu ze zmianami wymuszeń wejściowych, zarówno zdeterminowanymi (np. zmiana obrotów, obciążenia), jak i nie zdeterminowanymi (zakłócenia w postaci zmiennych warunków eksploatacji) generują rozrzut własności funkcjonalnych poszczególnych egzemplarzy pojazdów. W konsekwencji należy przyjąć tezę, że zmienność stanów pojazdów w czasie obarczona jest elementem przypadkowości (składnikiem losowym).

Występujące w czasie eksploatacji pojazdu uszkodzenia zespołów są związane ściśle z charakterem zmian wartości wymuszeń działających na pojazdy. W odpowiadającej temu podejściu klasyfikacji wyróżnia się :

- a) uszkodzenia zużyciowe, będące wynikiem nieodwracalnych zmian właściwości początkowych pojazdów, zachodzących podczas eksploatacji wskutek procesów starzenia i zużywania się (starzenie się w czasie użytkowania i przechowywania, zużywanie się w czasie użytkowania);
- b) uszkodzenia przypadkowe (nagłe), które powstają w wyniku działania bodźców skokowych powodujących przekroczenie ustalonych wartości dopuszczalnych.

Uszkodzenia zużyciowe występują najczęściej w okresie zużycia normalnego i zależą przede wszystkim od czynników eksploatacyjnych, takich jak:

- warunki klimatyczne (praca [76]),
- warunki terenowe i drogowe (zmienne obciążenie układów pojazdu i duże zapylenie powietrza).

Uszkodzenia zużyciowe zespołów pojazdu, wywołane najczęściej zużyciem oraz zmianą nastaw regulacyjnych skojarzeń roboczych części, prowadzą do czasowych lub stałych uszkodzeń zespołów powodując w konsekwencji niezdatność pojazdów do pracy.

Uszkodzenia nagłe są związane z wadami konstrukcyjnymi i technologicznymi oraz przekroczeniem wartości dopuszczalnych przez czynniki wymuszające. Występują w okresie starzenia wstępnego, w okresie zużycia normalnego i w okresie zużycia przyspieszonego. Wywołane są działaniem wymuszeń o skokowej wartości widma i powodują całkowitą utratę zdatności do pracy zespołu pojazdu. Usunięcie ich polega na wymianie bądź regeneracji zespołów. Uszkodzenia nagłe zespołów pojazdu mają postać: złamania, rozerwania, deformacji kształtu, zatarcia, przepalenia, zwarcia i przerwy.

Uszkodzenia pojazdów w toku eksploatacji mogą więc zachodzić:

- a) wskutek powolnych, nieodwracalnych procesów starzeniowych i zużyciowych zachodzących w zespołach pojazdów;
- b) w wyniku pojawienia się procesów odwracalnych o różnej intensywności przebiegu, wywołanej przez czasowe przekroczenia dopuszczalnych wartości jednego lub więcej czynników wymuszających;
- b) w sposób skokowy, objawiający się nieciągłym przejściem jednej lub więcej cech poza granice przyjęte za dopuszczalne dla danego zespołu.

Główne przyczyny powstawania uszkodzeń klasyfikuje się jako :

- a) konstrukcyjne, są to uszkodzenia powstałe wskutek błędów projektowania i konstruowania zespołów pojazdów (np. nie uwzględniają obciążeń ekstremalnych);
- b) produkcyjne (technologiczne), są to uszkodzenia powstałe wskutek błędów i niedokładności procesów technologicznych (braku tolerancji wymiarów, gładkości powierzchni, obróbki termicznej) lub wad materiałów elementów zespołów;
- c) eksploatacyjne, są to uszkodzenia powstałe w wyniku nieprzestrzegania obowiązujących zasad eksploatacji lub wskutek oddziaływania czynników zewnętrznych nie przewidzianych dla warunków użytkowania zespołów pojazdów;
- d) starzeniowe, są to uszkodzenia będące rezultatem nieodwracalnych zmian, prowadzących do pogorszenia wytrzymałości.

Dominowanie jednej z postaci uszkodzeń a tym samym sposób określenia charakteru zmian stanu technicznego zespołów pojazdów w czasie eksploatacji, według autora, związane jest z następującymi czynnikami :

- a) rodzajem funkcji realizowanych przez zespół;
- b) rodzajem wymuszeń w postaci oddziaływania :
 - czynników konstrukcyjnych (poziomu konstrukcji i jej unifikacji),
 - czynników wytwórczych (poziomu produkcji, jakości i niezawodności zespołów pojazdu),
 - czynników eksploatacyjnych (warunków klimatycznych i drogowych, intensywności użytkowania, sposobu przechowywania i konserwacji, jakości napraw, jakości materiałów eksploatacyjnych, jakości realizacji zasad eksploatacji i kwalifikacji użytkowników);
- c) rodzajem procesu zużycia, który jest wywołany w zespołach pojazdów przez:
 - tarcie suche (opony, klocki i tarcze hamulców, tarcze sprzęgłowe),
 - tarcie graniczne i mieszane (połączenia ślizgowe układu tłokowo-korbowego i układu rozrządu, przekładnie, łożyska, przeguby),
 - korozję (nadwozie, elementy podwozia, układ wydechowy),
 - kawitację (tuleje cylindrów, łożyska ślizgowe, układ chłodzenia).

Długość poszczególnych okresów i intensywności zużycia zależą więc od potwierdzają także wyniki badań prowadzonych przez IEPM WAT [110], od cech konstrukcyjnych skjarzonych części, ich cech technologicznych oraz warunków eksploatacji.

Z punktu widzenia użytkownika pojazdu najbardziej interesujące są czynniki eksploatacyjne, można bowiem na nie wpływać i kształtować je zarówno w okresie starzenia wstępnego (np. wartości obciążenia, stosowane płyny eksploatacyjne), w okresie zużycia normalnego (zasady użytkowania oraz obsługi) i w okresie zużycia przyspieszonego (np. odpowiednia strategia obsługi zmniejsza prawdopodobieństwo zużycia nagłego).

W procesie eksploatacji następuje więc pogorszenie właściwości użytkowych pojazdów. Zwiększają się luzy w parach kinematycznych, osłabiają się mocowania elementów i zmieniają się nastawy regulacyjne. Następuje zatem zmiana własności zespołów pojazdów, co powoduje zmianę procesów wyjściowych realizowanych przez pracujące zespoły pojazdu.

Procesy wyjściowe dzieli się na:

- a) robocze, wynikające bezpośrednio z realizacji użytkowych funkcji urządzenia, np. przetwarzanie energii chemicznej w ciepło (pracę mechaniczną), przetwarzanie energii chemicznej w energię elektryczną, przetwarzanie energii elektrycznej w pracę mechaniczną, przetwarzanie energii kinetycznej w ciepło, przenoszenie i zwiększanie energii;
- b) towarzyszące, powstające jako wtórny efekt zasadniczych procesów roboczych, np. termiczne, wibroakustyczne, elektryczne generowane przy tarcu, starzenie środków smarnych;
- c) inne procesy fizyczno-chemiczne, wykorzystywane w badaniach nieniszczących, np. badania wizualne (endoskopowe i holograficzne), badania magnetyczne, badania radiograficzne, badania ultradźwiękowe.

Procesy wyjściowe można opisać wielkościami mierzalnymi, mierzonymi bez demontażu urządzenia, które nazywa się parametrami wyjściowymi Y_{wy} .

Można postawić tezę, że: **istnieje wzajemny związek cech stanu i parametrów wyjściowych.**

Tezę tę potwierdzają prace [47,71,113] oraz badania autora [42,98], na podstawie których podano dla niektórych układów pojazdów cechy stanu (ilościowe i jakościowe) i odpowiadające im parametry wyjściowe. Są to :

Dla układu tłokowo-korbowego silnika spalinowego :

- a) cechy stanu: zużycie (cylindra, tłoka, pierścieni tłoka, czopów głównych i korbowodowych, wkładów łożysk), luzy: tulei cylindra, tłoka i pierścieni tłokowych, łożysk głównych i korbowodowych, piasty tłoka-swożeń-głównka korbowodu,
- b) parametry wyjściowe: moc silnika, zużycie paliwa, ciśnienie sprężania, ubytek sprężonego czynnika, ilość spalin w skrzyni korbowej, ciśnienie oleju, zanieczyszczenia w oleju, parametry sygnału wibroakustycznego, temperatura spalin, zużycie oleju.

Dla układu smarowania silnika:

- a) cechy stanu: pęknięcia, zużycie uszczelniaczy, zanieczyszczenia siatki filtra, zużycie zębów kół zębatych, zanieczyszczenia kanałów, zanieczyszczenie oleju,
- b) parametry wyjściowe: poziom oleju, wydatek pompy, temperatura, ciśnienie, barwa i zanieczyszczenie oleju, stan cieplny silnika,

Dla układu zasilania w paliwo w silniku o zapłonie samoczynnym :

- a) cechy stanu: szczelność połączeń, zanieczyszczenie filtra, skorodowanie zbiornika, zużycie pary tłoczek-cylinderki pompy paliwowej, zużycie tłoczków i cylinderki w pompie wtryskowej, zanieczyszczenie otworków wtryskiwacza,
- b) parametry wyjściowe: opory przepływu, ciśnienie tłoczenia, kąt wyprzedzenia wtrysku, wartość dawki paliwa, jakość rozpylenia, moc silnika, zużycie paliwa, stan cieplny silnika, dymienie.

Dla układu napędowego pojazdu:

- a) cechy stanu: zużycia (tarczy sprzęgłowej, łożyska wyciskowego, wielowypustów wałków, zębów kół zębatych skrzyni biegów, synchronizatorów, kół zębatych prze-

kładni głównej i mechanizmu różnicowego, łożysk, uszczelniaczy), zanieczyszczenie tarczy sprzęgłowej,

- b) parametry wyjściowe: skok jałowy pedału sprzęgła, współczynnik poślizgu sprzęgła, hałas i drgania, sumaryczny luz obwodowy, bicie wału, luz osiowy, temperatura obudowy przekładni, moc strat w układzie napędowym, droga i czas wybiegu, zużycie paliwa.

Dla układu zasilania w energię elektryczną:

- a) cechy stanu: zużycie styków, szczotek, komutatora; przyspieszone samowyladowanie akumulatora, rozładowanie akumulatora, wyboczenie płyt, zasiarczanie akumulatora, zgrzewanie styków, zużycie łożysk prądnicy,
- b) parametry wyjściowe: napięcie i natężenie prądu, rezystancja uzwojeń, hałas i drgania, stan cieplny prądnicy, moc znamionowa prądnicy, iskrzenie, pojemność akumulatora, gęstość elektrolitu.

Przedstawione parametry wyjściowe stanowią podstawę do określenia cech sygnału diagnostycznego (parametrów diagnostycznych) $y_j \in Y$, które także zależą od stanu technicznego układów pojazdu. W celu wyznaczenia zbioru cech sygnału diagnostycznego (parametrów diagnostycznych) formułuje się kryteria (jednoznaczność, dostateczna szerokość pola zmian, dostępność), które pozwalają uznać parametry wyjściowe jako parametry diagnostyczne.

Stany techniczne, w których może znaleźć się układ pojazdu, tworzą zbiór $W = \{w_k, k=1, 2, \dots, K\}$, zaś konkretny stan w_k układu jest wyznaczony przez N niezależnych cech stanu u_n jako wektor $w_k = (u_n); n=1, 2, \dots, N$.

Liczba stanów układu pojazdu w_k zależy od wymagań, jakie w praktyce eksploatacyjnej stawia się procesowi oceny stanu technicznego pojazdu. W najprostszym przypadku zbiór możliwych stanów $W = \{w_k\}$ dzieli się na klasy :

- klasę stanów zdatności W^0 ,
- klasę stanów niezdatności W^1 .

Przy założeniu szeregowej struktury niezawodnościowej pojazdu wyróżnia się dwa skrajne przypadki:

- a) jeżeli w układzie pojazdu o p zespołach występuje pojedyncze uszkodzenie, wówczas jest jeden stan zdatności W^0 i $W_p^1 = p$ stanów niezdatności,
- b) jeżeli dopuszcza się dowolną kombinację jednoczesnego uszkodzenia zespołów, to liczba stanów wynosi: jeden stan zdatności W^0 i W_k^1 stanów niezdatności.

Przy założeniu k - wartościowej oceny stanów, liczbę stanów niezdatności określa wyrażenie $W_p^1 = k^p - 1$, co powoduje znaczny wzrost liczby stanów i w konsekwencji komplikuje algorytmy oceny stanu technicznego układów pojazdu. Dlatego też przy ustalaniu liczby stanów przedmiotu diagnozy dąży się do minimalizacji zbioru stanów stosując przy tym różne kryteria (przedstawione w pracy [64] i w pracy autora [42]), np. prawdopodobieństwo występowania stanów, bezpieczeństwo użytkowania pojazdu i struktury użytkowej.

Stan w_k będzie znany, jeśli będą znane wartości u_n . Zadanie to można rozwiązać zastępując cechy stanu $\{u_n\}$, w myśl przedstawionej powyżej tezy, odpowiednimi parametrami wyjściowymi $\{y_{jwy}\}$:

$$w_k = f_1(\{y_{jwy}\}); j = 1, 2, \dots, I \quad (1.1)$$

Pośrednie określanie stanu technicznego w_k jest możliwe, ponieważ, jak wykazano w pracy [64], prawdziwa jest zależność :

$$u_n = f_2 (\{y_j\}); \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (1.2)$$

Postać funkcji (1.2) ustala się podczas określania zależności pomiędzy cechami stanu i parametrami diagnostycznymi, gdzie uzyskuje się układ N równań typu (1.3) będący odwzorowaniem przestrzeni stanów, opisanej współrzędnymi u_1, u_2, \dots, u_N w przestrzeń parametrów diagnostycznych y_1, y_2, \dots, y_J . Ze względu na to, że posługiwanie się układami równań może być skomplikowane oraz kłopotliwe jest wyznaczenie wartości cech stanu, stan techniczny w_k układu pojazdu (przy założeniu prawdziwości 1.2) określany jest na podstawie wartości parametrów diagnostycznych $\{y_j, j=1, \dots, J\}$ według zależności:

$$w_k = f_3 (\{y_j\}); \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (1.3)$$

Zbiór możliwych do uwzględnienia parametrów diagnostycznych jest bardzo liczny, stąd występuje konieczność ich redukcji. Konsekwencją tego jest utrata informacji związanej z parametrami objętymi obserwacją i pojawienie się obszaru niewiedzy. Powoduje to, podobnie jak w przypadku cech stanu, element przypadkowości (składnik losowy). Istnienie tego składnika powoduje potraktowanie sygnałów diagnostycznych jako szczególnego rodzaju procesy losowe [52,63,113].

Przyjmując fakt, że zarówno cechy stanu pojazdu, jak i cechy sygnałów diagnostycznych zmieniają się w sposób ciągły w czasie (w przypadku wymiany lub regulacji zespołów zmiana może być skokowa) występuje konieczność dyskretnej reprezentacji takiego sygnału. Najczęściej stosuje się sposób reprezentowania losowych sygnałów diagnostycznych w dziedzinie czasu poprzez ciągi estymowanych wartości cech sygnału diagnostycznego. Czasowa historia zmienności cech sygnału (parametrów diagnostycznych) jest wówczas dana w postaci dyskretnych, uporządkowanych w czasie, ciągów wartości liczbowych. Ciągi tego typu są określone terminem „szeregu czasowego” [4,12,52,63,113]. Podstawą ustalenia kolejności elementów w „szeregu czasowym”, w przypadku pojazdów mechanicznych, jest liczba przejechanych kilometrów przez pojazd od początku eksploatacji (przebieg pojazdu) lub liczba godzin działania (liczba motogodzin).

Istotnym wymaganiami dla szeregu czasowego jest żądanie stałej wielkości tzw. „kroku czasowego” w tym szeregu. Wymóg ten należy rozumieć w ten sposób, że wartość funkcji porządkującej (np. przebieg pojazdu) dla każdego elementu szeregu musi różnić się od wartości tej funkcji dla elementu sąsiedniego o stałą wartość (według autora, ze względu na bierne i bierno-czynne eksperymenty diagnostyczne, wymóg ten w przypadku pojazdów może być trudno osiągalny).

Wskutek oddziaływania procesów wymuszających zużycie następują zmiany wartości cech stanu objawiające się pogorszeniem stanu technicznego zespołów pojazdu. Stopniowo kumulujące się zmiany doprowadzają do osiągnięcia wartości granicznych cech stanu, a także wartości granicznych odpowiadających im cech sygnału diagnostycznego (parametrów diagnostycznych), podczas których następuje zmiana lub pełna utrata właściwości eksploatacyjnych układu, przy których dalsza eksploatacja pojazdu jest niemożliwa lub nieopłacalna.

Przekroczenie wartości granicznej mierzonych parametrów diagnostycznych oznacza wejście zespołów pojazdów mechanicznych w stan przyspieszonego zużycia.

W przypadku diagnostyki bezpośredniej i w eksperymentach czynnych ustalenie wartości granicznych dla zorientowanych uszkodzeniowo parametrów diagnostycznych jest stosunkowo proste [113].

Problem komplikuje się w diagnostyce pośredniej, w której ustalenie stanu granicznego na podstawie parametru jest trudniejsze. Realizowane najczęściej w przypadku pojazdów biernie i bierno-czynne eksperymenty diagnostyczne dostarczają wartości parametrów diagnostycznych, które podczas wnioskowania diagnostycznego są porównywane z wartościami granicznymi dostępnymi w normach krajowych, zagranicznych, branżowych lub z danymi własnych doświadczeń.

W przypadku braku takich norm możliwe jest wyznaczanie wartości granicznych parametrów diagnostycznych poprzez statystyczny opis procesu eksploatacji, np. za pomocą metody Neymana-Pearsona [8,113].

Reasumując powyższe rozważania stwierdza się, że:

1. Różnorodność procesów zużycia zespołów pojazdu mechanicznego wymusza konieczność dekompozycji pojazdu na układy i zespoły, przy czym jako kryteria takiej klasyfikacji powinny być realizowane przez układy i zespoły funkcje oraz dominujący w nich proces zużycia.
2. W procesie eksploatacji pojazdów wyróżnia się trzy okresy przebiegu intensywności uszkodzeń. Według autora, prognozowanie stanu technicznego pojazdów możliwe i sensowne jest tylko w okresie zużycia normalnego, chociaż należy dążyć, aby możliwe było w każdym z tych okresów.
3. Procesy wyjściowe będące przejawem funkcjonowania zespołów pojazdów stanowią bogate źródło danych o zmianie stanu technicznego zespołów w czasie eksploatacji pojazdów, zaś duża liczebność zbioru parametrów wyjściowych daje podstawę wyznaczenia cech sygnału diagnostycznego (parametrów diagnostycznych zorientowanych uszkodzeniowo).
4. Przy założeniu, że występuje zależność funkcyjna pomiędzy cechami stanu i cechami sygnału diagnostycznego (parametrami diagnostycznymi) możliwa jest ocena stanu technicznego układów i zespołów za pomocą zbioru wartości parametrów diagnostycznych. Według autora, założenie to powinno być zweryfikowane.
5. Sygnały diagnostyczne układów i zespołów pojazdów mechanicznych mogą być traktowane jako szczególne procesy losowe, zaś „szeregi czasowe” wartości cech sygnałów diagnostycznych (parametrów diagnostycznych) mogą być traktowane jako dyskretna reprezentacja realizacji takich procesów. W przypadku układów i zespołów pojazdów mechanicznych liczba uwzględnianych parametrów diagnostycznych jest zazwyczaj większa od jedności, co decyduje o konieczności analizy wielowymiarowych szeregów czasowych.

1.1.3. Stan i ocena wiedzy z zakresu prognozowania stanu technicznego urządzeń

Autor biorąc udział w wielu pracach z zakresu diagnostyki pojazdów mechanicznych [66,89,90,91], ukierunkowanych na doskonalenie metod i środków diagnostycznych oraz strategii obsługi pojazdów mechanicznych, stwierdził, że problematyka procesu prognozowania stanu technicznego w aspekcie wykorzystania go w strategii

obsługiwania według stanu technicznego wydaje się być szczególnie interesująca z punktu widzenia potrzeb praktycznych.

Opracowania na wskazany temat, które w ostatnich latach pojawiły się w kraju i za granicą, dotyczą przede wszystkim wykorzystania metod prognostycznych w diagnostyce maszyn.

I tak w pracy Batki [4] proponuje się wykorzystanie w celu budowy „diagnoz predykcyjnych” rozwiązania z grupy adaptacyjnych modeli trendu przedstawiając przy tym także inne metody, np. kart kontrolnych, wag harmonicznych i filtracji Kalmana, przy czym koncentruje się przede wszystkim na analizie jednowymiarowych szeregów czasowych.

W pracy Będkowskiego i Dąbrowskiego [7] rozpatrzono zagadnienia prognozowania systemu antropotechnicznego, w procesie diagnostycznym, w oparciu o trajektorie efektywnościowe i efektowe.

Metody adaptacyjne wykorzystywane były także w pracach Cempla przy prognozowaniu stanu maszyn [21,22], który stosuje je w badaniach diagnostycznych maszyn, proponując równocześnie inne, np. wykorzystanie dla potrzeb prognostycznych tzw. modelu tribowibroakustycznego maszyny (TWA) [18], gdzie przedstawia także sposób formułowania prognoz w wymiarze „czasu życia” urządzenia na podstawie zużyciowego modelu urządzenia jako procesora energii [17,20].

W pracy Kaźmierczaka [52] przedstawiono modele liniowe ARMA/ ARIMA służące do wyznaczania prognoz elementów szeregu czasowego, uzyskanych przy badaniu procesów technologicznych w hutnictwie.

Proste modele typu „stan-parametr diagnostyczny” do prognozowania niezawodnej pracy zespołów pojazdu mechanicznego rozpatruje się w pracy Nizińskiego [65].

W pracy Żółtowskiego [115] przedstawiono zagadnienie okresowości diagnozowania maszyn w ujęciu symptomowym, wykorzystując znaną wartość graniczną symptomu.

Częste sygnały o badaniach nad prognozowaniem w diagnostyce maszyn pojawiają się również w literaturze zagranicznej (prace: Voxa i Jenkinsa, Brighta, Browna i Mayera, Соха, Чьева, Frandla, Гаскарова, Михлина, Мозгалевсково, Theila i innych [12,13,15,27,28,36,40,60,62,63,86,104]).

Przedstawione w literaturze badania są ukierunkowane na analizę pojedynczych realizacji procesów zachodzących w badanych maszynach lub w systemach antropotechnicznych. Wyjątek stanowi praca [52], w której przedstawia się sposób rozwiązania zadania prognostycznego dla wielowymiarowej przestrzeni sygnału diagnostycznego.

Według autora, cytowane powyżej opracowania, które w ostatnich latach pojawiły się w kraju i za granicą, dotyczą przede wszystkim wykorzystania metod prognostycznych w diagnozowaniu maszyn, w małym zaś stopniu są stosowane w postaci algorytmów obliczeniowych dla pojazdów mechanicznych. Z jednej strony wynika to z braku zainteresowania informacjami prognostycznymi przez służby techniczne zakładów, z drugiej strony nielicznymi propozycjami (prace Гаскарова, Marciniaka, Nizińskiego [40,57,65] i prace autora [66,89,92]), stanowiącymi wycinkowe rozwiązania problemu prognozowania stanu technicznego pojazdu lub zgłaszającymi konieczność opracowania algorytmów prognozowania stanu technicznego pojazdu. Nie ma także żadnych opracowań wykorzystujących narzędzia optymalizacji wielokryterialnej, mających na celu rozwiązanie problemu prognozowania stanu technicznego pojazdu według algorytmu:

stan techniczny pojazdu → parametry diagnostyczne opisujące ten stan → metoda prognozowania wykorzystująca parametry diagnostyczne → prognoza stanu technicznego pojazdu → wykorzystanie prognozy stanu technicznego w eksploatacji pojazdu.

Projektowane i wprowadzane obecnie w krajach Unii Europejskiej przepisy ISO [36, 73] dotyczące wymagań, jakie mają spełniać pojazdy, obok ograniczeń związanych z toksycznością spalin i zużyciem paliwa, narzucają również wymagania dotyczące diagnozowania poszczególnych układów pojazdu, w tym szczególnie silnika i układów bezpieczeństwa jazdy. Przewiduje się tu systemy OBD (On - Board - Diagnosis), które rozpoznają, zapamiętują, sygnalizują i prognozują w ECU (Electronic Control Unit) uszkodzenia zespołów pojazdu.

Potwierdzeniem tych tendencji są prowadzone badania w USA, Wielkiej Brytanii, RFN, Francji i Japonii [33,34,35,37,39,41,45,47,60], mające na celu wprowadzenie do pokładowych i stacjonarnych systemów diagnostycznych pojazdów mechanicznych - urządzeń do prognozowania stanu technicznego. Ponadto stwierdza się, że proste algorytmy prognostyczne zaczynają stanowić element standardowego oprogramowania przyrządów diagnostycznych do badań maszyn, np. przyrządy firm „Schenck” i „Bruel & Kjaer” [52,104].

Stwierdza się też [65,71], że w diagnostycznych systemach pokładowych i stacjonarnych pojazdów (Abrams, Leclerc, Bradley) oraz samochodów Mercedes, BMW, Volvo występują już załączki wykorzystania informacji prognostycznej do celów logistycznych (np. przewidywany zapas przebiegu gaśienic i przewidywany zapas paliwa w pojazdach Abrams i Bradley).

Taki stan rzeczy skłonił autora do opracowania metody wyznaczania prognozy stanu technicznego pojazdu mechanicznego, możliwej do wykorzystania w strategii obsługi według stanu technicznego. Próby takie czyni autor od kilku lat prowadząc badania problemowe prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych.

Początkowym etapem tych badań było rozpoznanie możliwych do zastosowania metod prognozowania w procesie prognozowania stanu technicznego pojazdu. Wynikiem tego etapu prac były referaty i artykuły [66,89,92], w których przedstawiono możliwe do wykorzystania metody prognozowania. Ogólny opis tych metod oraz wyjaśnienie powodów ich wyboru zawarte są w rozdziale 2.

Kolejnym etapem było rozszerzenie prac badawczych na ogólnie rozumiany proces prognozowania stanu technicznego pojazdu, niezbędny do funkcjonowania strategii obsługi według stanu technicznego. Wynikiem tego etapu, między innymi, stała się koncepcja racjonalizacji procesu prognozowania stanu technicznego pojazdu poprzez jego optymalizację, zaś rezultatem omawianych badań jest niniejsza praca.

1.1.4. Prognozowanie stanu technicznego zespołów pojazdów mechanicznych

Z perspektywy tendencji, jakie występują w badaniach diagnostycznych pojazdów, można ocenić, że coraz częściej sygnalizuje się potrzeby formułowania prognoz stanu technicznego pojazdów jednak w rzeczywistości ogranicza się badania do zakresu pozwalającego formułować bieżące diagnozy. Wynika to z faktu, że uzyskanie takich ocen wymaga mniejszego nakładu pracy i jest dużo łatwiejsze od czynności koniecznych do

oszacowania przewidywanych zmian stanu pojazdów. Pominięcie tego typu ocen związane jest z przyjęciem milczącego założenia, że skoro zespoły pojazdu aktualnie wykazują pewne właściwości, to będą je posiadały również przez pewien czas. Jest oczywiste, że tak sformułowanych przewidywań nie można uznać za zadowalające, określenie bowiem stanu technicznego pojazdu w wybranej chwili czasu zawiera tylko informację o jego aktualnym stanie technicznym. Dla potrzeb strategii obsługiwanego według stanu technicznego niezbędne jest wyznaczenie terminu następnego diagnozowania.

Stan zespołu $W(t_n)$ w chwili czasu t_n można scharakteryzować za pomocą zbioru wartości parametrów diagnostycznych $\{y_j(t); j=1,2,\dots,m\}$ (patrz wzór 1.2).

Zespół w chwili t_n znajduje się w stanie zdadności W^0 , gdy spełniony jest warunek:

$$W(t_n) = W^0 \Leftrightarrow \forall (j=1,\dots,m) \quad [\{y_{j,d}\} \leq \{y_j(t_n)\} \leq \{y_{j,g}\}] \quad (1.5)$$

gdzie: $\{y_{j,d}\}, \{y_{j,g}\}$ - zbiory dolnych i górnych wartości granicznych parametrów diagnostycznych.

Analogicznie można sformułować warunek zdadności w chwili $t_{n+\tau}$:

$$W(t_{n+\tau}) = W^0 \Leftrightarrow \forall (j=1,\dots,m) \quad [\{y_{j,d}\} \leq \{y_j(t_{n+\tau})\} \leq \{y_{j,g}\}] \quad (1.6)$$

przy czym elementy zbioru $\{y_j(t_{n+\tau})\}$ są nieznanne i stąd konieczność ich przewidywania w założonym przedziale czasu τ .

Wielkość τ oznacza przedział czasu, dla którego realizowany jest proces prognozowania (wielkość τ nazywa się także wyprzedzeniem lub „horyzontem czasowym prognozy”).

W ujęciu tym ocenę czasu przejścia urządzenia w stan niezdatności wyznaczają wyniki prognoz parametrów diagnostycznych $\{y_j(t_{n+\tau})\}$, sygnalizujące przekroczenie wartości granicznych.

Zdaniem Batki [4] postępowanie takie traktuje proces wyznaczania prognozy jako proces rozpoznania możliwości dalszego użytkowania urządzenia.

Zdaniem autora postępowanie takie umożliwi także wyznaczenie terminu diagnozowania pojazdu w strategii obsługiwanego według stanu technicznego.

Realizowane to może być według następujących sposobów (prace z zakresu eksploatacji maszyn [4,18,22,57] oraz prace prowadzone z zakresu eksploatacji pojazdów mechanicznych [64,65] i prace autora [42,66,89,92] :

1. Prognozowanie stanu technicznego pojazdu polega na określeniu zmian wartości parametrów diagnostycznych, charakteryzujących proces pogarszania stanu w przyszłości.

W tym sposobie stan techniczny układu lub zespołu pojazdu, przedstawia się w postaci funkcji wektorowej :

$$Y(t) = [y_1(t), \dots, y_j(t), \dots, y_m(t)],$$

o przebiegu dyskretnym lub ciągłym w czasie t_1, \dots, t_b (t_1 -czas początku eksploatacji pojazdu, t_b - czas badania pojazdu), przy czym wiadome są wartości funkcji $Y(t_1), \dots, Y(t_b)$ w tym czasie.

Następnie określa się przebieg funkcji $Y(t_b+\tau)$, przy czym prognoza może dotyczyć funkcji $Y(t)$, jak również każdej jej składowej $y_j(t)$.

Przyjmuje się jednak wówczas założenie, że przebieg funkcji $Y(t_b+\tau)$ jest „podobny” do przebiegu funkcji $Y(t_1), \dots, Y(t_b)$; czyni się to przy przyjęciu założenia, że istnieje ciągłość zmian wartości badanych parametrów diagnostycznych. Wnioskowanie takie, szczególnie w zakresie „podobieństwa przebiegu funkcji $Y(t)$ ”, według autora, może być uzasadnione tylko przy należytych poznaniu przebiegu tych zmian, np. w okresie przebiegu zużycia normalnego i nieuwzględnieniu nieciągłości wynikających z wymiany lub regulacji zespołów pojazdu (ze względu na właściwości eksploatacji pojazdu konieczna jest weryfikacja tego założenia, patrz punkt 4.4).

2. Wynik prognozowania określa się jako prawdopodobieństwo znajdowania się wartości parametrów diagnostycznych pojazdu poza przedziałem wartości granicznych.

Przy prognozowaniu prawdopodobieństwa znajdowania się zespołów pojazdu w stanie zdatności zakłada się, że znane są wartości parametrów diagnostycznych $y_j(t_i)$ w czasach $t_i, i=1, \dots, b$ oraz gęstości prawdopodobieństwa zmian parametrów diagnostycznych $f_i(y_j)$ w czasie t .

Poszukiwane prawdopodobieństwo znajdowania się parametru y_j w przedziale $y_j < y_{jg}$ określa zależność:

$$P [y_j(t) < y_{jg}] = \int_{-\infty}^{y_{j,g}} f_i(y_j) dy_j \quad (1.7)$$

gdzie: y_{jg} - wartość graniczna parametru y_j .

Praktycznie więc, obliczenie poszukiwanego prawdopodobieństwa sprowadza się do scałkowania funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa określonego w procesie prognozowania. Określenie wartości parametrów rozkładów funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f_i(y_j)$ wymaga badań niezawodnościowych zespołów pojazdu. Przeprowadzenie takich badań byłoby celowe, gdyby interesująca użytkownika pojazdu prognoza miała być przedstawiona jako prawdopodobieństwo utrzymania zdatności zespołów pojazdu. W rozważanym przypadku (obsługiwanie według stanu technicznego) wymaganą postacią prognozy jest termin diagnozowania układów i zespołów pojazdu.

3. Na podstawie prognozy kwalifikuje się układ lub zespół pojazdu do odpowiedniej klasy według kryterium założonego poziomu niezawodności lub trwałości.

W tym przypadku prognozowanie polega na zakwalifikowaniu danego zespołu do jednej z klas na podstawie danych uzyskanych w czasie badania.

Zakłada się, że w chwili t_1 lub w przedziale czasu t_1, \dots, t_b dysponuje się wartościami parametrów diagnostycznych y_1, y_2, \dots, y_m , na podstawie których klasyfikuje się zespół do odpowiedniej klasy $R^\lambda, \lambda = 1, \dots, n$.

Rozróżnia się przy tym klasy parametryczne (według stanu zdolności do pracy, R^1_y, \dots, R^n_y) i czasowe (według bezawaryjności R^1_T, \dots, R^n_T).

Wielkości $R^l_y = y_2 - y_1, \dots, R^n_y = y_{n-1} - y_{gr}$ reprezentują dopuszczalne zakresy zmienności parametrów, zaś wielkości $R^l_T = T_2 - T_1, \dots, R^n_T = T_{n-1} - T_n$ wybrane zakresy czasów.

Biorąc pod uwagę fakt, że występujące w czasie eksploatacji pojazdu nieodwracalne procesy zużycia zespołów pojazdu wymuszają monotoniczny trend wartości kontrolowanych parametrów diagnostycznych oraz, że zmiany wartości parametrów diagnostycznych pomiędzy poszczególnymi badaniami stanu mogą istotnie różnić się, przy czym zazwyczaj nie znane są ich funkcje gęstości prawdopodobieństwa, można przyjąć następującą tezę:

„Prognozowanie stanu technicznego zespołów pojazdu (dla strategii obsługiwanania według stanu) powinno polegać na określeniu zmian wartości parametrów diagnostycznych, przyrównaniu ich wartości chwilowych do wartości granicznych oraz wyznaczeniu na tej podstawie terminu następnego diagnozowania zespołów pojazdu”.

Przyjmując tę tezę, sformułowano wymagania, które należy uwzględnić podczas wyznaczenia prognozy stanu technicznego (PST) zespołów pojazdu. Są to:

1. Różny charakter zużycia zespołów pojazdu, różnorodność realizowanych funkcji oraz różna ich struktura niezawodnościowa wymaga odpowiedniej dekompozycji pojazdu na układy i zespoły oraz doboru odpowiednich dla nich procedur prognozowania.
2. Różnorodność procesów fizycznych zachodzących w zespołach pojazdu oraz związane z nimi metody diagnostyczne oparte na pomiarze wartości parametrów procesów (roboczych i towarzyszących) determinuje dużą liczebność zbioru parametrów wyjściowych, co umożliwi wybór parametrów diagnostycznych, z drugiej strony wymaga zastosowania odpowiednich procedur takiego wyboru.
3. Zbiór wybranych parametrów diagnostycznych może być często wieloelementowy, stąd zdolność analizy takich zbiorów powinna być uwzględniona przy wyborze odpowiedniej metody prognozowania;
4. Przerwy w eksploatacji pojazdu, zmiana warunków eksploatacji oraz czynności obsługowe powodują zazwyczaj skokową zmianę jego stanu technicznego. Wymaga to więc metod prognostycznych dopasowujących się do nowego skorygowanego poziomu wartości parametrów diagnostycznych. Stąd zdolność analizy zmian skokowych wartości parametrów diagnostycznych powinna być uwzględniona przy wyborze odpowiedniej metody prognozowania.
5. Przyjęcie odpowiedniej wartości „horyzontu czasowego prognozy”, tzn. przedziału czasu, dla którego wyznaczana jest prognoza, determinowane jest wymaganiami użytkownika. Ponadto występują tu też różne ograniczenia narzucane przez producenta, np. w postaci terminów czynności smarowniczych i terminów wymian płynów eksploatacyjnych.
6. Użytkownik strategii obsługiwanania pojazdów według stanu technicznego żąda, aby prognozą stanu był termin następnego diagnozowania pojazdów.

Przedstawione wymagania w problematyce prognozowania stanu pojazdów mechanicznych, wynikające z właściwości eksploatacji pojazdu mechanicznego, determi-

nują odpowiedni zbiór problemów związanych z procesem prognozowania stanu technicznego pojazdu.

Według autora wyróżnić można trzy grupy problemów:

1. Analizę poddawanego prognozowaniu pojazdu. Zagadnienia, które należy rozwiązać w tej grupie to:
 - a) analiza procesu pogarszania się stanu technicznego zespołów pojazdu (określenie tendencji i dynamiki zmian wartości parametrów diagnostycznych);
 - b) wybór stanów, w których może znaleźć się pojazd (dekompozycja pojazdu na układy i zespoły, wybór stanów i prawdopodobieństwo ich występowania);
 - c) wybór parametrów diagnostycznych „najlepiej” opisujących wyróżnione stany.
2. Metody prognozowania. Problemem w tej grupie jest wybór "najlepszej" procedury wyznaczania prognozy.
3. Wykorzystanie informacji prognostycznej. Należy rozpatrzyć w tym przypadku zagadnienia związane ze zbieraniem, przetwarzaniem i przechowywaniem informacji prognostycznej oraz podejmowaniem na jej podstawie decyzji odnośnie terminu diagnozowania pojazdów.

Uwzględniając powyższe postulaty, przeprowadzono analizę możliwości wyznaczania prognoz w oparciu o przedstawione w pracach [4,13,14,18,21,22,52,57, 62,65] i w pracy autora [66] modele prognostyczne, które poddano próbie selekcji i klasyfikacji ze względu na ich potencjalną przydatność w procesie prognozowania stanów pojazdów mechanicznych. Są to :

a. Klasyczna ekstrapolacja trendu

Zasada prognozowania polega tu na arbitralnym doborze dla historii obserwowanego zjawiska odpowiedniej aproksymaty, którą ekstrapoluje się następnie na prognozowane przedziały czasu.. Najczęściej stosowanymi w tej grupie są rozwiązania aproksymujące trend wartości symptomów stanu funkcjami: liniowymi, potęgowymi, wielomianowymi i wykładniczymi. Wybór konkretnej aproksymaty według przyjętego kryterium, np. wartości średniej błędu dopasowania wynika z oceny dopasowania uzyskiwanych na jej podstawie wyników do danych empirycznych,

Zdaniem autora, zaletą tego typu procedur jest prostota estymacji parametrów diagnostycznych. Dają one rezultaty, gdy zmiany wartości parametrów diagnostycznych są regularne lub dysponuje się adekwatnymi modelami procesów uszkodzenia się urządzeń, jak i modelami generacji przypisanych im parametrów. Ponadto należy przyjąć założenie (często mało realne w przypadku pojazdu - patrz wymagania) utrzymywania się przyjętej tendencji rozwojowej w prognozowanych okresach. Z tego względu tworzone są różne modyfikacje tych rozwiązań, np. w pracach [4,57] poprzez ograniczenie procesu estymacji funkcji trendu do zawężonego zbioru danych (pomijanie najstarszych obserwacji) lub, jak proponuje autor [66,92], poprzez dołączenie, w każdym punkcie czasowym po czasie t_b , wartości rzeczywistej trendu do budowy jego aproksymaty.

b. Adaptacyjne modele trendu

Rozwiązania te omijają etap wyznaczenia analitycznej postaci trendu obserwowanego procesu stochastycznego, tworząc od razu oszacowania jego liczbowych wartości. Procedury te w sposób iteracyjny, przy każdej nowej obserwacji analizowanego zjawia-

ska oraz wyniku prób prognozowania modyfikują przyjęty model trendu poprzez zmianę parametrów funkcji prognozującej (predyktora) lub jej postaci. Umożliwia to szybkie dopasowanie modelu do zmian badanego procesu stochastycznego.

Ich zaletą jest prostota realizacji, umożliwiając one bowiem budowę prognoz według rekurencyjnych formuł obliczeniowych przy ograniczonej liczbie łatwo weryfikowanych założeń. Wadą ich jest natomiast brak oszacowania "ex ante" dokładności predykcji czy trudności związanej z doбором właściwych sposobów estymacji, np. stałych adaptacji, chociaż trudność tę można ominąć, jak wykazano w pracy autora [89], poprzez odpowiednią optymalizację stałych adaptacji tego modelu.

Zdaniem autora, na podstawie tych rozwiązań możliwe są obliczenia rozwoju zjawisk opisywanych zarówno długimi, jak i krótkimi realizacjami, co w myśl przedstawionych postulatów stwarza możliwość ich wykorzystania w prognozowaniu stanu technicznego pojazdów.

c. Rozwiązania oparte na autonomicznej ekstrapolacji procesów stochastycznych

Realizują one operacje filtracji i predykcji. Pierwsza z nich polega na konstrukcji, na podstawie dostępnego fragmentu prognozowanej realizacji, układu (filtru), który drogą minimalizacji przyjętego kryterium błędu na jego wyjściu umożliwia wybór, odpowiedniego dla modelowanego zjawiska, typu procesu stochastycznego. Poprzez ekstrapolację tak wybranego procesu stochastycznego realizowany jest następnie proces prognozy przyszłych jego wartości. Oceniając ich przydatność z punktu uwarunkowań eksploatacji pojazdów należy stwierdzić, że najważniejszym wymaganiem do ich poprawnego stosowania jest możliwość dostępu do długich realizacji zjawisk podlegających prognozowaniu (w przypadku pojazdów jest to mało realne), warunkuje to bowiem poprawną identyfikację ich własności probabilistycznych oraz parametrów ich modeli.

Według autora, przedstawione modele, jak i cytowane prace, w postaci algorytmów obliczeniowych, w małym stopniu są stosowane dla pojazdów mechanicznych. Z jednej strony wynika to z braku zainteresowania informacjami prognostycznymi przez służby transportowe zakładów, z drugiej strony jest uwarunkowane nielicznymi propozycjami (patrz 1.1.3) stanowiącymi wycinkowe rozwiązania problemu prognozowania stanu technicznego pojazdu. Odnosi się to w szczególności do braku istnienia ogólnych schematów postępowania wyznaczających algorytmy obliczeniowe prognoz. Ponadto brak jest konkretnych propozycji, gdy prognozę stanu technicznego pojazdów trzeba określić na podstawie obserwacji diagnostycznych reprezentowanych wieloelementowymi zbiorami, co ma miejsce w przypadku układów pojazdów.

1.1.5. Podsumowanie i wnioski

Reasumując powyższe rozważania, stwierdza się że:

1. W strukturze niezawodnościowej pojazdów wyróżnia się zbiór połączonych szeregowo, równoległe lub w sposób mieszany zespołów.
 Dekomponując więc pojazd na poszczególne układy lub, w przypadku układu o połączeniu mieszanym, na podukłady, możliwe jest określenie parametru uogólnionego dla układu lub podukładu pojazdu. Z tego względu stopień szczegółowości informa-

- cji prognostycznej powinien dotyczyć układów, w niektórych przypadkach - podukładów lub zespołów pojazdów.
2. Obserwacje diagnostyczne realizowane podczas eksploatacji pojazdów reprezentowane są pojedynczymi realizacjami kontrolowanych zjawisk, często mało licznymi (w sensie statystycznym).
Mała liczba obserwacji, przy małej liczbie elementów szeregu czasowego obserwacji diagnostycznych, preferuje więc rozwiązania niewrażliwe na małą liczebność obserwacji.
 3. Podczas obsługiwanego pojazdu według stanu technicznego (rys.1.1) użytkownika interesuje termin następnego diagnozowania zespołów pojazdów.
Postulat ten spełniają przede wszystkim modele ekstrapolacyjne i adaptacyjne, niewiadoma jest tylko ich wrażliwość na wartość „horyzontu czasowego prognozy” wymaganą przez użytkownika.
 4. W przypadku wymiany zespołu pojazdu (np. przy zwarciu instalacji elektrycznej, zatarciu silnika, urwaniu wału napędowego), w myśl algorytmu (rys. 1.1) następuje skokowa zmiana wartości parametrów diagnostycznych, co preferuje metody prognozowania zdolne analizować takie zmiany i wyznaczyć termin diagnozowania przy założonym (przez użytkownika) minimalnym błędzie prognozy.
 5. W celu otrzymania poprawnej prognozy stanu technicznego pojazdów:
 - a) należy uwzględnić (po ich dekompozycji) dynamikę i charakter ich zużycia, w celu identyfikacji:
 - dominującego charakteru zużycia,
 - rodzaju zaistniałych i hipotetycznych uszkodzeń,
 - stanów układów lub zespołów pojazdu;
 - b) w zależności od struktury niezawodnościowej pojazdów i charakteru zużycia jego zespołów należy określić „najlepszy” zbiór parametrów diagnostycznych, odwzorowujących zmianę stanu technicznego zespołów pojazdów w czasie eksploatacji;
 - c) w zależności od charakteru zużycia zespołów pojazdu, postaci trendu, liczebności obserwacji, horyzontu prognozy i wymaganej postaci informacji prognostycznej należy określić „najlepszą” metodę prognozowania.

1.2. Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych

Sposób przeprowadzenia optymalizacji procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów można związać z kolejnymi etapami tego procesu. Wykorzystując prace [4,52,65,113] autor przyjął je jako:

- a) dobór modelu obiektu,
- b) dobór miary jakości prognozy,
- c) sformułowanie ograniczeń funkcji prognozującej,
- d) budowę funkcji prognozującej,
- e) budowę algorytmu prognozy,
- f) obliczenie i weryfikacja prognozy.

Podstawowym kryterium kwalifikującym metodę prognozowania jako najbardziej efektywną jest wykorzystanie modelu matematycznego obiektu, tzn. całej wiedzy

o obiekcie (np. równań fizyczno-chemicznych, zależności przyczynowo-skutkowych), co pozwala na zapisanie dokładnych równań modelu. Informację o nieznanach wielkościach dają modele probabilistyczne i chociaż są one najbardziej popularne, to jednak nieświadome przyjmowanie założeń, np. dotyczących niezależności, stacjonarności i rozkładu może prowadzić do błędnych wniosków. Dlatego też przyjęcie modelu probabilistycznego zazwyczaj jest poprzedzone odpowiednimi badaniami analizowanych zjawisk, w tym też badaniami niezawodnościowymi.

Następnym z elementów procesu prognozowania wpływający na jego jakość są wymagania jakościowe narzucane a priori na prognozę. Idealną prognozę otrzymuje się, gdy błąd prognozy jest równy zeru :

$$e_p(t) = y_p(t) - y(t) = 0 \quad (1.14)$$

gdzie:

$y_p(t)$ - prognozowana wartość parametru diagnostycznego
w chwili t ,

$y(t)$ - wartość parametru diagnostycznego w chwili t .

Praktycznie jest to niemożliwe, nakłada się więc inne słabsze wymaganie polegające na minimalizacji błędu prognozy.

Wymagania jakościowe dotyczące prognoz dzieli się na dwie kategorie: ograniczenia i warunki optymalizacyjne. Ograniczenia w przypadku modeli probabilistycznych sprowadzają się do tego, aby wartość oczekiwana błędu prognozy spełniała warunek:

$$Q = E[e_p(t)] = 0 \quad (1.15)$$

Warunki optymalizacyjne sprowadzają się do żądania, aby predyktor (funkcja prognozująca) minimalizował pewien wskaźnik jakości, najczęściej w postaci:

$$Q = E\{L[e_p(t)]\} \quad (1.16)$$

gdzie funkcja L zawiera wartości rzeczywiste. Postać L może wynikać z celu prognozy. Najczęściej wskaźnik Q przyjmuje się jako:

$$Q = E[e_p^2(t)] \quad (1.17)$$

i nazywa błędem średniokwadratowym.

W praktyce najczęściej nie wyznacza się funkcji prognozującej od początku, ale korzysta się z pewnych gotowych algorytmów prognozowania. Większość stosowanych funkcji prognozujących to funkcje nieobciążone i optymalne w sensie średniokwadratowym. Z przedstawionych modeli (patrz punkt 1.1.4) własności takie posiadają także metody adaptacyjne i ekstrapolacyjne trendu.

Wymagania strukturalne wiąże się z wyborem odpowiedniej funkcji prognozującej (predyktora), tzn. takiej operacji P , która na podstawie zbioru informacji Y_b (zbiór wartości parametrów diagnostycznych w czasie t_b) pozwala obliczyć prognozę Y_p (zbiór wartości parametrów diagnostycznych w czasie t_p):

$$Y_p = P(Y_b) \quad (1.18)$$

Jednym z często stosowanych ograniczeń jest żądanie, które według autora należy przyjąć także dla pojazdu mechanicznego, aby funkcja prognozująca nie korzystała z bardzo „starych pomiarów” i dla obserwacji dyskretnych w czasie była funkcją tylko ostatnich n - pomiarów (funkcje prognozujące o ograniczonej pamięci).

Innym ograniczeniem jest wymaganie liniowości funkcji względem obserwacji lub liniowości funkcji względem nieznanych współczynników, co umożliwia rozwiązanie problemów nieliniowych, przy czym należy przyjąć wówczas założenie o stosunkowo małych wartościach „horyzontu czasowego prognozy” τ .

Wyznaczając prognozy nie można ściśle wykazać wyższości pewnych funkcji prognozujących nad innymi, niemożliwe bowiem są rozstrzygnięcia w oderwaniu od zjawisk, których prawidłowości mają przewidywać. Ostateczny osąd, według autora, wyznaczają wyniki empirycznych ocen, przebiegających według zasady :

„ta metoda jest lepsza, która lepiej w sensie przyjętego kryterium prognozuje zmianę stanu technicznego pojazdu”.

Wiąże się to ze sformułowaniem wymagań , które z jednej strony ujmowałyby pragmatyczne ujęcie przedstawionych powyżej etapów prognozowania i związane z nimi sposoby ich optymalizacji; z drugiej strony uwzględniałyby specyficzny charakter procesu eksploatacji pojazdu i generowane przez niego ograniczenia i wymagania.

Wykorzystując powyższe stwierdzenie sformułowano następujący algorytm wyznaczania prognozy:

- a) wyznaczyć zbiór o minimalnej liczebności dostarczającej maksimum informacji o stanie technicznym w dziedzinie cech stanu $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, będących przejawem funkcjonowania pojazdu (procesy robocze, procesy towarzyszące);
- b) określić wymagania jakościowe i strukturalne wynikające z właściwości pojazdu, które narzuca się na określony zbiór parametrów wyjściowych Y_{wy} ;
- c) dobrać, przy założeniu że prawdziwe jest założenie (1.2), „najlepszy” opis zespołów i układów pojazdu w dziedzinie parametrów diagnostycznych $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ odwzorowujących zmianę cech stanu pojazdu $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ w czasie jego eksploatacji;
- d) wyróżnić wartości graniczne cech stanu U_g i odpowiadające im wartości graniczne parametrów diagnostycznych Y_g ;
- e) dokonać wyboru i weryfikacji „najlepszego” predyktora, przyjętego do analizy z pewnej klasy predyktorów (np. modele adaptacyjne i ekstrapolacji trendu lub inne);

Użyte powyżej pojęcie „najlepsze” wymaga rozpatrzenia powyższego algorytmu w kategoriach poszukiwania rozwiązania zadania optymalizacji.

Cechą charakterystyczną każdego zadania optymalizacji jest występowanie pewnego niepustego zbioru X , zwanego zbiorem rozwiązań dopuszczalnych. W przedstawionym opracowaniu, w myśl przedstawionych powyżej ustaleń, będzie to zbiór dopuszczalnych decyzji odnośnie możliwości realizacji etapów prognozowania.

Typowe zagadnienie optymalizacyjne, z jednym skalarnym wskaźnikiem jakości, formułuje się następująco [1] :

Wyznaczyć takie $x^0 \in X$, że

$$F(x^0) = \sup_{x \in X} F(x) \quad (1.19)$$

gdzie:

X - niepusty zbiór rozwiązań dopuszczalnych,

$F : X \rightarrow R^1$ - wskaźnik jakości (kryterium decyzji).

W praktyce, formułując zadanie optymalizacyjne często trudno jest, jak wykazuje autor w pracach [89,92,94], określić jedną skalarną funkcję jakości F , bowiem rozwiązania dopuszczalne X (metody wyboru parametrów diagnostycznych, metody prognozowania) mogą mieć wiele różnych właściwości, których wartości świadczą o jakości rozwiązania.

Wprowadzenie jednego skalarnego wskaźnika jakości byłoby bardzo subiektywne. Stąd też zachodzi konieczność sformułowania w tym przypadku zadania optymalizacyjnego z wieloma (np. N) wskaźnikami jakości w postaci funkcji kryterium F

$$F : X \rightarrow R^N \quad (1.20)$$

Funkcja ta przyporządkowuje każdemu rozwiązaniu dopuszczalnemu $x \in X$ jego liczbową ocenę w postaci wektora :

$$F(x) = (F_1(x), \dots, F_n(x), \dots, F_N(x)) \in R^N \quad (1.21)$$

gdzie:

$N = \{1, \dots, n, \dots, N\}$ - zbiór numerów wskaźników jakości

$F_n(x)$ - wartość n - tego wskaźnika jakości (n - tej funkcji kryterium dla rozwiązania $x \in X$).

W przedstawionym przypadku będą to liczbowe charakterystyki rozwiązań dopuszczalnych, istotnych z punktu widzenia „najlepszego” rozwiązania.

Kolejnym pojęciem, związanym z zagadnieniem optymalizacji, jest przestrzeń kryterialna B . Jest to zbiór wszystkich wartości kryterium F , jakie przyjmuje na zbiorze X

$$B = \{b = F(x) \in R^N \mid x \in X\} \quad (1.22)$$

Jest to obraz zbioru X w R^N . Celowy wybór pewnego pożądanego rozwiązania $x \in X$ powoduje porównywanie między sobą różnych rozwiązań, które odbywa się za pośrednictwem porównywania wartości liczbowych poszczególnych ocen $F_n(x)$ porównywanych rozwiązań. Zatem decyzja o tym, czy rozwiązanie x_1 jest „lepsze” od rozwiązania x_2 (np. czy metoda prognozowania x_1 jest „lepsza” od metody prognozowania x_2), zapada w trakcie porównania ich obrazów liczbowych $F(x_1)$ i $F(x_2)$. Określając zatem, które rozwiązanie dopuszczalne jest „najlepsze”, należy badać nie zbiór X (np. zbiór metod prognozowania), lecz zbiór B (np. przestrzeń kryterialną zbioru metod prognozowania).

Reasumując powyższe rozważania, autor stwierdza, że optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdu, mająca na celu opracowanie metody wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego (PST^o) zespołów pojazdu, powinna polegać na:

- określeniu zbioru rozwiązań dopuszczalnych X , którego elementami są przedstawione etapy prognozowania, co wymaga sformułowania schematu konstruowania prognozy;
- określeniu funkcji kryterialnej F , której elementy są egzemplifikacją wymagań jakościowych i strukturalnych wynikających z właściwości procesu eksploatacji pojazdu (charakter zużycia zespołów, czynniki eksploatacyjne, czynniki konstrukcyjno-jakościowe, charakter wymuszeń zewnętrznych, postulaty wynikające ze sformułowanego celu prognozowania);
- rozwiązaniu zadania optymalizacji wielokryterialnej i określeniu „najlepszego” zbioru parametrów diagnostycznych i „najlepszej” metody prognozowania;

- d) określeniu wrażliwości uzyskanych procedur na niektóre czynniki wynikające z własności procesu eksploatacji pojazdu mechanicznego (które nie zostały uwzględnione jako elementy funkcji kryterialnej F);
- e) badaniach weryfikacyjnych metody wyznaczania optymalnej prognozy w aspekcie możliwości jej wykorzystania dla układów i zespołów pojazdu mechanicznego;
- f) opracowaniu koncepcji wykorzystania optymalnej prognozy (PST^o) w eksploatacji, a także w pozostałych fazach istnienia pojazdu.

1.3. Cel i zakres pracy

Biorąc pod uwagę zawarte w poprzednich podrozdziałach wnioski i zalecenia oraz potrzebę i możliwość opracowania metody wyznaczania prognozy stanu technicznego dla pojazdów mechanicznych można sformułować cel główny pracy w postaci:

„Opracować metodę wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego (PST^o) pojazdów mechanicznych”.

Aby zrealizować ten cel należy:

1. **Opracować metodę wyznaczania prognozy stanu technicznego (PST) jako terminu następnego diagnozowania pojazdów mechanicznych.**
2. **Opracować metodykę wyznaczania optymalnej prognozy (PST^o), w tym sformułować zadanie optymalizacji wielokryterialnej oraz przedstawić schemat jego rozwiązania w postaci:**
 - a) wyznaczenia zbioru rozwiązań dopuszczalnych X , którego elementami są przedstawione etapy prognozowania, co wymaga sformułowania schematu konstruowania prognozy;
 - b) określenia funkcji kryterialnej F , której elementy są egzemplifikacją wymagań wynikających z własności procesu eksploatacji pojazdów;
 - c) rozwiązania zadania optymalizacji wielokryterialnej i określenia „najlepszego” zbioru parametrów diagnostycznych i „najlepszej” metody prognozowania.
3. **Określić wrażliwość uzyskanych procedur na niektóre czynniki wynikające z własności procesu eksploatacji pojazdów mechanicznych (które nie zostały uwzględnione jako elementy funkcji kryterialnej F).**
4. **Przeprowadzić badania weryfikacyjne metody wyznaczania optymalnej prognozy (PST^o) w aspekcie możliwości jej wykorzystania w eksploatacji pojazdów mechanicznych.**
5. **Opracować koncepcję wykorzystania prognozy (PST^o) w eksploatacji, a także w pozostałych fazach istnienia pojazdów mechanicznych.**

W kolejnych rozdziałach pracy przedstawione zostaną propozycje rozwiązań tych problemów.

ROZDZIAŁ 2

ZAGADNIENIE WYZNACZANIA PROGNOZY STANU TECHNICZNEGO POJAZDÓW MECHANICZNYCH

2.1. Wyznaczanie prognozy stanu technicznego zespołów pojazdu mechanicznego

W celu poprawnego funkcjonowania strategii obsługiwanego pojazdu mechanicznego według stanu technicznego istnieje potrzeba opracowania metody wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego (PST^o) jako terminu następnego diagnozowania zespołów pojazdu (rys.1.1). Dlatego też w tym rozdziale podane zostaną zasady wyznaczania optymalnej prognozy (PST^o) oraz zostaną określone elementy zbioru rozwiązań dopuszczalnych i elementy funkcji kryterialnej zadania optymalizacyjnego.

Wykorzystując ustalenia poczynione w poprzednim rozdziale oraz uwzględniając wnioski z analizy prac z zakresu eksploatacji maszyn [4,9,10,17,40,47,53,60,65] oraz prac z zakresu ekonometrii [105,111] i wnioski z przeprowadzonych badań własnych [89,96,97], przyjęto następujące założenia:

- 1) zasadniczą i dominującą przyczyną przejścia pojazdu ze stanu zdatności w stan niezdatności są uszkodzenia spowodowane starzeniem i zużywaniem się zespołów pojazdu;
- 2) różnorodność procesów zużycia zespołów pojazdu oraz różnorodność realizowanych funkcji przez zespoły powoduje, że poziom szczegółowości informacji prognostycznej powinien odnosić się do układów lub zespołów pojazdu;
- 3) prognozowanie stanu technicznego pojazdów możliwe jest, ze względu na przebieg procesu zużycia zespołów pojazdów, tylko w okresie zużycia normalnego;
- 4) proces zmian wartości parametrów diagnostycznych pojazdów w czasie ich eksploatacji T_E jest ciągłym niestacjonarnym procesem stochastycznym, który może być reprezentowany szeregiem czasowym dyskretnych obserwacji. Mechanizm zmian tego procesu w czasie T_E kształtuje trend zakłócany różnymi oddziaływaniami losowymi;
- 5) podstawą ustalania kolejności elementów w szeregu czasowym jest liczba przejechanych przez pojazd kilometrów od początku eksploatacji lub liczba godzin działania (tzw. motogodzin);
- 6) dyskretny szereg czasowy otrzymuje się w wyniku dokonywania obserwacji co pewien ustalony odstęp czasu, zwany „krokiem czasowym” szeregu czasowego. Żąda się przy tym, aby wielkość ta miała stałą wartość;
- 7) proces diagnostyczny pozwala wyróżnić zbiór parametrów diagnostycznych Y , które umożliwiają określenie stanu technicznego układów i zespołów pojazdu. Są to najczęściej zbioru wieloelementowe;
- 8) dla parametrów diagnostycznych można określić wartości graniczne, po przekroczeniu których diagnozowane zespoły pojazdu należy traktować jako uszkodzone;
- 9) charakter zależności między stanem technicznym układów lub zespołów pojazdu i parametrami diagnostycznymi zmienia się w czasie eksploatacji pojazdu, przy czym ze względu na przerwy w eksploatacji, wymiany lub regulacje zespołów występują skokowe zmiany wartości parametrów diagnostycznych;

10) ze względu na różnorodność czynników wymuszających zużycie zespołów pojazdu w czasie jego eksploatacji wyznaczoną PST można stosować tylko do pojazdu, dla którego została określona. Jednak nie oznacza to możliwości unifikacji PST, ze względu na wprowadzany system jakości, przynajmniej dla jednego typu (marki) pojazdów mechanicznych.

Istotą wykorzystania prognozy (PST) jest ocena dopuszczalnego czasu użytkowania zespołów pojazdu według informacji prognostycznej. Problemem jest wówczas ekstrapolacja na przedział czasu (przebiegu) $\tau = t_p - t_b$ wartości parametrów diagnostycznych $\{y_j(t); j=1, \dots, m\}$, którą uzupełnia badanie zawierania się uzyskanych wyników prognoz $\{y_{j,p}(t_b+\tau)\}$ w obszarach dopuszczalnych zmian, przy czym wielkość τ nazywa się wyprzedzeniem lub „horyzontem czasowym prognozy”.

Rozwiązanie tego problemu jako zadania wyznaczania prognozy stanu technicznego (PST), według przyjętych powyżej założeń, można przedstawić w postaci poniższego schematu:

1. Niech zjawisko pogarszania się stanu technicznego zespołów pojazdu będzie reprezentowane szeregiem czasowym $y_t = \langle y_1, y_2, \dots, y_b \rangle$, tj. zbiorem dyskretnych obserwacji $\{y_t = \zeta(t); t = t_1, t_2, \dots, t_b\}$ pewnego niestacjonarnego procesu stochastycznego $\zeta(t)$;
2. Przy założeniu, że mechanizm zmian wartości procesu stochastycznego w czasie $t \in (t_1, t_b)$ kształtuje trend $\mu(t)$ zakłócony różnymi oddziaływaniami losowymi $\eta(t)$

$$y_t = \mu(t) + \eta(t) \quad (2.1)$$

gdzie:

$\mu(t)$ - charakteryzuje składnik zdeterminowany szeregu czasowego y_t ; opisuje on tendencję rozwojową obserwowanego parametru diagnostycznego $y(t)$,

$\eta(t)$ - charakteryzuje odchylenia od trendu i wyraża działanie czynników przypadkowych (warunki terenowe, warunki klimatyczne, jakość obsługi)

konstruuje się takie oszacowanie $\{\mu_p(t); t = 1, 2, \dots, b\}$ dla nieznaney postaci trendu $\mu(t)$, które zapewniłoby odpowiednią dokładność prognozy $y_p(t)$, przy ekstrapolacji $\mu_p(t)$ na przedział czasu (przebiegu pojazdu) $\langle t_b, t_p \rangle$, $t_p = t_b + \tau$;

3. Oszacowanie $\mu_p(t)$ wyznacza wartości obserwowanych parametrów diagnostycznych w prognozowanej chwili t_p , a tym samym prognozy PST układów lub zespołów pojazdu $W(t_b + \tau)$;
4. Jako dopuszczalny okres użytkowania zespołów i układów pojazdu T_D przyjmuje się czas, w którym granice przedziału błędów dla poszczególnych prognoz

$$\sigma(y_t, y_p, P(y_t, \tau)) \quad (2.2)$$

określone na podzbiornie $\Omega^y \subset \Omega$ dostępnych realizacji obserwowanych parametrów $\{y_j(t)\}$ oraz ich prognozach $\{y_{j,p}\}$ według przyjętego predyktora $P(y_t, \tau)$ nie przekraczają wartości granicznych $\{y_{j,g}\}$;

5. Wartość dopuszczalnego czasu użytkowania T_D układu lub zespołu pojazdu wyznacza horyzont prognozy τ_j^0 , dla którego nie wystąpi przekroczenie wartości granicznej parametru diagnostycznego $y_{j,g}$ przez granicę przedziału błędów prognozy wyznaczoną przez promień r_σ

$$r_{\sigma} = q\sigma_p \quad (2.3)$$

gdzie:

- q - parametr stały wyznaczany z tablicy rozkładu Studenta dla wymaganego poziomu ufności γ i $K-2$ liczby stopni swobody,
- σ_p - odchylenie standardowe składnika losowego błędu prognozy e_p ;

6. W przypadku obsługiwanego według stanu technicznego wymaga się, aby PST dla układów lub zespołów pojazdu zawierała termin następnego diagnozowania t_{b1} . Ponadto proponuje się, aby wielkościami dodatkowymi PST były: wartość błędu prognozy e_p i promień granicy przedziału błędu prognozy r_{σ} :

$$PST = \langle t_{b1}, e_p, r_{\sigma} \rangle \quad (2.4)$$

7. Jako wartość t_{b1} proponuje się przyjąć wartość dopuszczalnego czasu użytkowania układu lub zespołu pojazdu określony wartością przedziału czasu (przebiegu) $\{\tau_j^0\}$. Wyznaczany on jest przez punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego $y_{j,g}$ z dolną (przy założeniu, że $y(t_b) > y_{j,g}$) lub górną (przy założeniu, że $y(t_b) < y_{j,g}$) granicą przedziału błędu prognozy określoną przez promień r_{σ} dla dwóch współczynników ufności:

- a) $r_{\sigma}^{0,01}$ dla poziomu ufności $1 - \gamma = 0,99$, co odpowiada prawdopodobieństwu o wartości $p=0,01$, kiedy to w przedziale wyznaczonym przez horyzont czasowy τ_j^* parametr diagnostyczny y_j osiągnie wartość graniczną $y_{j,g}$;
- b) $r_{\sigma}^{0,05}$ dla poziomu ufności $1 - \gamma = 0,95$, co odpowiada prawdopodobieństwu o wartości $p=0,05$, kiedy to w przedziale wyznaczonym przez horyzont czasowy τ_j^{**} parametr diagnostyczny y_j osiągnie wartość graniczną $y_{j,g}$.

Wyróżnia się wówczas trzy opcje (rys.2.1):

1. Nieprzekroczenie przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień $r_{\sigma}^{0,01}$ interpretuje się jako brak sygnału alarmu do wnikliwej i bardziej dokładnej obserwacji diagnostycznej zespołu lub układu pojazdu (opcja zielona);
2. Przekroczenie przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień $r_{\sigma}^{0,01}$ interpretuje się jako sygnał alarmu do wnikliwej i bardziej dokładnej obserwacji diagnostycznej zespołu lub układu pojazdu (próg alertowy - opcja żółta);
3. Chwila przekroczenia przez kontrolowany parametr diagnostyczny granicy wyznaczonej przez promień $r_{\sigma}^{0,05}$ interpretuje się jako czas t_{b1} - termin następnego diagnozowania układu lub zespołu pojazdu (próg alarmowy - opcja czerwona).

Przedział czasu (t_1, t_b) będzie wówczas okresem estymacji wartości błędu prognozy e_p i promienia r_{σ} , zaś przedział czasu po t_b będzie okresem aktywnego prognozowania, tzn.:

- a) wyznaczenia wartości prognozowanej parametru diagnostycznego po czasie τ , $y_{j,p}(t_b+\tau)$,
- b) wyznaczenia wartości promienia $r_{\sigma}(t_b+\tau)$,
- c) wyznaczenia terminu następnego diagnozowania zespołu lub układu pojazdu t_{b1} .

Sposób estymacji wartości błędu prognozy e_p i określenie promienia r_{σ} zostanie podana przy identyfikacji metod prognozowania w punkcie 2.2.2.

Przedstawiony sposób wyznaczania PST dla układów lub zespołów pojazdu oraz możliwości jego optymalizacji wymusza potrzebę i stwarza możliwość sformułowania algorytmu opracowania metody wyznaczania optymalnych prognoz (PST^o) dla pojazdów mechanicznych w postaci:

- a) określenia schematu wyznaczania PST,
- b) sformułowania zadania optymalizacji wyznaczania PST,
- c) określenia metody rozwiązania sformułowanego zadania optymalizacyjnego,
- d) badań weryfikacyjnych metody wyznaczania optymalnej prognozy (PST^o) w aspekcie możliwości jej wykorzystania w obsłudze pojazdów według stanu technicznego,
- e) opracowania koncepcji wykorzystania PST^o w eksploatacji pojazdów.

Opierając się na wnioskach z analizy prac z zakresu prognozowania stanu maszyn [4,10,17,53,60,65,67] oraz badań własnych [96,97] wyznaczanie PST autor wyróżnia jako pewien zbiór czynności, które występują w odpowiedniej kolejności (rys. 2.2).

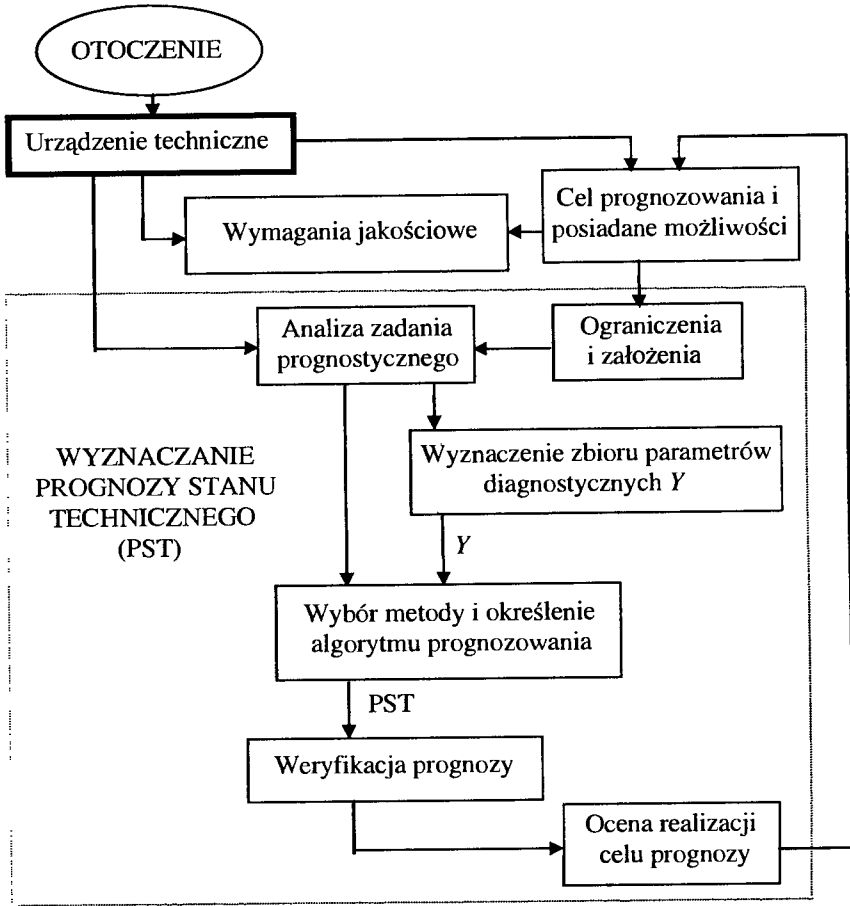
Wielkościami wejściowymi są: zamierzony cel prognostyczny, wartości parametrów diagnostycznych, posiadane możliwości realizacji odpowiednich możliwości prognostycznych (metody prognostyczne) oraz informacje o obiekcie badań i jego otoczeniu. Wielkością wyjściową jest wynik realizacji procesu wyznaczania PST w postaci terminu diagnozowania układów i zespołów pojazdu. Poszczególne bloki schematu reprezentują kolejno podejmowane czynności i towarzyszące im decyzje, które są elementami procesu wyznaczania PST.

Analiza zadania prognostycznego zależy od rodzaju obiektu. W zależności od tego jaki jest to zespół lub układ pojazdu oraz jakie cechy stanu są celem badania diagnostycznego, należy rozpatrzyć możliwe oddziaływania różnorodnych czynników otoczenia, a szczególnie ich wpływ na przebieg procesów zużyciowych.

Etap wyznaczania zbioru wartości parametrów diagnostycznych związany jest z czynnościami wyboru i rejestracji informacji uzyskanych podczas diagnozowania zespołów i układów pojazdu. Konsekwencją realizacji tego etapu powinno być uzyskanie optymalnego zbioru danych w postaci wartości parametrów diagnostycznych w chwilach t_i , $t_i \in (t_a, t_b)$.

Etap wyboru predyktora jest zasadniczym elementem procesu prognozowania. Wybór właściwej metody jest trudny, ponieważ uwarunkowany jest nie tylko dostępną liczbą danych czy informacji wyznaczających granice poznania istoty fizycznej prognozowanych zjawisk, lecz także względami realizacyjnymi, które determinują, w jakich okolicznościach i przy użyciu jakich środków będzie realizowane wyznaczanie prognozy.

Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest konieczność podjęcia problemu wyboru metod prognozowania. Zdaniem autora, w trakcie wyboru rozwiązania należy zwrócić uwagę na to, aby spełniały one postulaty wynikające z właściwości pojazdu mechanicznego (patrz rozdział 1), a przede wszystkim opierały się na małej liczbie elementów szeregu czasowego oraz aby cechowała je zdolność szybkiej adaptacji do możliwych zmian obserwowanych parametrów diagnostycznych. Istotną sprawą powinna być też możliwość algorytmizacji i możliwość sensownej interpretacji wyników prognozy.



Rys. 2.2. Schemat wyznaczania prognozy stanu technicznego (PST)

Etap weryfikacji przyjętego rozwiązania prognostycznego polega zarówno na ocenie stopnia dokładności prognozy ocenianej według przyjętego kryterium, jak i na ocenie jej wiarygodności. W praktyce przydatność metody wyznacza, przeważnie możliwy do przyjęcia, rząd wielkości błędów prognoz (np. jak przyjęto w pracy [105] 10% wartości prognozowanej wielkości). Granice dopuszczalnych błędów przyjmować mogą różne wartości dla parametrów diagnostycznych, jak i horyzontu prognozy. Dla niektórych metod wyznacza się mierniki oceny typu „ex post” obliczonych na podstawie wyników prognoz i faktycznie zaobserwowanych wartości prognozowanych parametrów diagnostycznych. Uzupełnienie stanowi zazwyczaj wiarygodność prognozy. Wyznaczają je obliczenia zawierania się wartości obserwowanych parametrów diagnostycznych w wyznaczonych przedziałach wartości prognoz z wymaganym poziomem ufności.

Końcowym etapem realizacji komentowanych etapów procesu konstruowania prognoz jest ocena osiągniętych wyników, tzn. porównanie, na ile rezultaty odpowiadają zamierzonemu celowi. Konsekwencją takiej oceny powinna być decyzja o akceptacji przyjętego sposobu rozwiązania lub, jeśli rozwiązania są niezadowalające, konieczność

jego modyfikacji. Na schemacie (rys.2.2) działanie takie reprezentuje sprzężenie zwrotne oceny osiągniętych wyników.

Podsumowanie i wnioski

Mając na uwadze ustalenia poczynione w rozdziale 1 pracy oraz przedstawiony powyżej schemat konstruowania PST, autor uważa, że najbardziej istotnymi elementami tego schematu powinny być:

1. Wyznaczenie zbioru rozwiązań dopuszczalnych X_1 (zbioru metod wyboru parametrów diagnostycznych).
2. Wyznaczenie zbioru rozwiązań dopuszczalnych X_2 (zbioru metod prognozowania).
3. Ustalenie warunków akceptacji i sposobów oceny przydatności rozwiązań optymalnych dla pojazdów mechanicznych w postaci :
 - a) określenia postaci funkcji kryterialnej F ;
 - b) badania wrażliwości rozwiązań optymalnych (optymalny zbiór parametrów diagnostycznych, optymalna metoda prognozowania) na czynniki charakterystyczne dla pojazdów mechanicznych (patrz postulaty w rozdziale 1).
4. Badania weryfikacyjne metody budowy optymalnej prognozy w aspekcie możliwości jej wykorzystania w strategii obsługiwaniania pojazdów według stanu technicznego.

2.2. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych wyznaczania prognozy

Zbiór rozwiązań dopuszczalnych X wyznaczania prognozy PST stanowią dwa zbiory:

X_1 - zbiór metod wyznaczania parametrów diagnostycznych,

X_2 - zbiór metod prognozowania

$$X = \{X_1, X_2\} \quad (2.6)$$

gdzie:

$$X_1 = \{x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n}\}$$

$$X_2 = \{x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,m}\} \quad (2.7)$$

2.2.1. Metody wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych

Zbiór parametrów diagnostycznych wyróżnia się ze zbioru parametrów wyjściowych. Na ogół przyjmowanymi kryteriami są warunki niezależności, jednoznaczności i mierzalności parametrów; należy traktować je jednak jako warunki wstępne.

Analizując prace z zakresu eksploatacji maszyn dotyczące problemu redukcji liczby parametrów diagnostycznych [19,53,54,65,83,84,114], nie spotkano prac, z wyjątkiem [10,19,54,114], w których by podjęto problem optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych dla potrzeb prognozowania stanu technicznego urządzeń.

Na podstawie przeprowadzonych badań [96], mających na celu potwierdzenie niektórych propozycji zawartych w pracach [10,54], autor uważa, że wyznaczanie zbioru parametrów diagnostycznych w procesie prognozowania powinno uwzględniać:

- zdolność odwzorowania zmian stanu technicznego zespołów pojazdu w czasie eksploatacji,
- ilość informacji o stanie technicznym zespołów pojazdu,
- odpowiednią zmienność wartości parametrów diagnostycznych w czasie eksploatacji pojazdu.

Dlatego metody uwzględniające, w postaci odpowiednich algorytmów, te postulaty zostały przedstawione poniżej jako elementy zbioru X_1 . Metody te zostały opracowane i zweryfikowane przez autora [96]. Są to:

Metoda maksymalnej wrażliwości parametru diagnostycznego na zmianę stanu technicznego $x_{1,1}$

Istota metody polega na tym, że ze zbioru parametrów wyjściowych układu lub zespołu pojazdu wybiera się ten parametr, który charakteryzuje się największą wartością wskaźnika a_j , uwzględniającego zależność parametrów od stanu technicznego [66]:

$$a_j = \sum_{i=1}^k M(i, j) ; i=1,2,\dots, k; j=1,\dots, m \quad (2.8)$$

gdzie:

$M(i,j) \in [M(i,j)]_{k \times m}$ - element binarnej macierzy diagnostycznej układu lub zespołu pojazdu.

Wybór parametru y^* do zbioru parametrów diagnostycznych, według autora, powinien sprowadzić się wówczas do wyboru y_j o maksymalnych wartościach a_j :

$$\begin{aligned} y^* &= y_{j^*} \\ j^* &\in 1,\dots, m \wedge a_{j^*} = \max (a_j) \\ &j=1,\dots,m \end{aligned} \quad (2.9)$$

Metoda maksymalnej względnej zmiany parametru diagnostycznego $x_{1,2}$

W metodzie tej wybiera się ten parametr diagnostyczny, który posiada największą wartość wskaźnika k_j . Uwzględnia on średnią prędkość zmiany parametrów w przedziale czasu (t_1, t_b) . Określa się go według wyrażenia:

$$\begin{aligned} k_j &= \frac{b_j}{\sum_{j=1}^m b_j} \\ b_j &= \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{|y_j(t_{i+1}) - y_j(t_i)|}{(t_{i+1} - t_i) |y_j(t_1) - y_{j,g}|} \end{aligned} \quad (2.10)$$

gdzie K - liczebność elementów szeregu czasowego w przedziale $[t_1, t_b]$.

Wybór parametru diagnostycznego y^* odbywa się według wyrażenia:

$$\begin{aligned} y^* &= y_{j^*} \\ j^* &\in 1,\dots, m \wedge k_{j^*} = \max (k_j) \\ &j=1,\dots, m \end{aligned} \quad (2.11)$$

Metoda maksymalnej pojemności informacyjnej parametru diagnostycznego $x_{1,3}$

Istota metody polega na wyborze parametru dostarczającego największą ilość informacji o stanie technicznym zespołów pojazdu. Parametr diagnostyczny ma tym większe znaczenie w określeniu zmiany stanu technicznego pojazdu, im silniej jest z nim skorelowany i im słabiej jest skorelowany z innymi parametrami diagnostycznymi.

Zależność tę przedstawia się w postaci wskaźnika integralnej pojemności parametru diagnostycznego h_j , który jest modyfikacją (dokonaną przez autora dla potrzeb redukcji parametrów diagnostycznych w procesie prognozowania) podobnego wskaźnika odnoszącego się do zbioru zmiennych objaśniających model ekonometryczny przedstawiony w pracy [111]:

$$h_j = \left| \frac{r_j^2}{1 + \sum_{i,j=1}^m |r_{i,j}|} \right| \quad (2.12)$$

gdzie :

$r_j = r(W, y_j); j = 1, \dots, m$ - współczynnik korelacji liniowej między zmiennymi W (stan zespołu pojazdu) i y_j

$r_{i,j} = r(y_i, y_j); i, j = 1, \dots, m; i \neq j$ - współczynnik korelacji liniowej między zmiennymi y_i i y_j

W przypadku braku danych ze zbioru W , za pracę [46] autor proponuje je zastąpić, przy założeniu, że budowa PST jest realizowana, w przedziale zużycia normalnego, przebiegu pojazdu). Wówczas:

$r_j = r(t_i, y_j); j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, K$ - współczynnik korelacji liniowej między zmiennymi $t_i \in (t_1, t_b)$ (t_i - przebieg pojazdu) i y_j .

Wybór parametru y_j^* do zbioru parametrów diagnostycznych sprowadza się wówczas do maksymalizacji wskaźnika h_j według wyrażenia :

$$\begin{aligned} y_j^* &= y_{j^*} \\ j^* &\in 1, \dots, m \wedge h_{j^*} = \max(h_j) \\ j &= 1, \dots, m \end{aligned} \quad (2.13)$$

Metoda maksymalnej zmienności parametru diagnostycznego $x_{1,4}$

Parametry diagnostyczne muszą wykazywać dostateczną zmienność wartości w czasie eksploatacji pojazdu. Ze zbioru parametrów wyjściowych wybiera się te parametry, które charakteryzują się największą wartością wskaźnika zmienności g_j

$$g_j = \frac{s_j}{\sum_{j=1}^m s_j}, \quad s_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{|y_j(t_{i+1}) - y_j(t_i)|}{t_{i+1} - t_i} \quad (2.14)$$

gdzie: K - liczebność elementów szeregu czasowego w przedziale (t_1, t_b) .

Wybór parametru diagnostycznego y^* odbywa się na podstawie wyrażenia:

$$y^* = y_{j^*}$$

$$j^* \in 1, \dots, m \wedge g_{j^*} = \max (g_j) \quad (2.15)$$

$$j = 1, \dots, m$$

Zaletą przedstawionych metod jest to, że pozwalają wybrać ze zbioru parametrów wyjściowych jednoelementowe, jak i wieloelementowe zbiory parametrów diagnostycznych. Zbiór jednoelementowy odnosi się do przypadku, gdy układ pojazdu jest zdekomponowany na zespoły i konieczny jest wybór jednego parametru diagnostycznego. Zbiór wieloelementowy otrzymuje się, gdy w przedstawionych procedurach stosuje się mniej ostre ograniczenie polegające na zakwalifikowaniu do zbioru parametrów diagnostycznych tych parametrów, których wartości wskaźników są większe (mniejsze) od, przyjętych odpowiednio dla metody, małych (dużych) liczb dodatnich.

Przedstawione procedury wyboru parametrów diagnostycznych uwzględniają, chociaż w różnym stopniu, zmiany wartości parametrów w funkcji zmiany stanu technicznego zespołów. Ze względu na to, że w miarę upływu czasu następuje zmiana natężenia i kierunku powiązań parametrów diagnostycznych ze stanem technicznym zespołów, może okazać się, że najlepszy z punktu widzenia przyjętych kryteriów, w danym okresie zbiór parametrów diagnostycznych nie będzie taki w innym okresie prognozowanym.

Autor uważa, że nieuwzględnienie tego faktu spowoduje mniejszą wartość poznawczą formułowanych prognoz. Dlatego też, gdy określony zbiór parametrów diagnostycznych ma służyć prognozowaniu stanu technicznego zespołów pojazdu, wskazane jest badanie wrażliwości tego zbioru przy zmianie warunków eksploatacji (warunki drogowe i klimatyczne) oraz przy regulacji lub wymianie zespołów pojazdów.

2.2.2. Metody prognozowania

Przedstawiając metody prognozowania nie można ściśle wykazać wyższości pewnych metod prognozowania nad innymi. Zależy to bowiem, jaki obiekt jest przedmiotem badań prognostycznych.

Na podstawie:

- 1) sformułowanych w rozdziale 1 pracy wymagań dotyczących :
 - a) postaci prognozy PST,
 - b) wpływu zmiany warunków eksploatacji pojazdów i czynności obsługowych na właściwości eksploatacyjne pojazdu, które należy uwzględnić przy wyborze metody prognozowania;
- 2) możliwych do wykorzystania metod prognozowania (metody ekstrapolacyjne trendu i metody adaptacyjne);
- 3) wyników badań prowadzonych przez autora [89,97], mających na celu weryfikację tych metod jako elementy zbioru X_2 proponuje się w dalszych rozważaniach uwzględnić następujące metody.

Metoda parametru uogólnionego $x_{2,1}$

Istota metody polega na tym, że proces pogarszania się stanu technicznego zespołu lub układu pojazdu opisywany przez funkcję wielu zmiennych (parametrów diagnostycznych $y_j(t)$) zastępuje się funkcją jednej zmiennej $Y(t)$ według wyrażenia:

$$|y_j(t)| = \frac{\sum_{j=1}^M w_j |y_j(t)|^\lambda}{\sum_{j=1}^M w_j} \quad (2.16)$$

gdzie $|y_j(t)|$ - względna wartość modułu parametru diagnostycznego

$$|y_j(t)| = \left| \frac{y_j(t) - y_{j,g}}{y_{j,n} - y_{j,g}} \right| \quad (2.17)$$

oraz:

$y_j(t)$ - wartość parametru $y_j \in Y$ w chwili $t \in (t_1, t_b)$,

$y_{j,g}$ - wartość graniczna parametru y_j ,

$y_{j,n}$ - wartość nominalna parametru y_j lub jego wartość w chwili t_1 ,

w_j - wartość funkcji wagi parametru y_j ,

λ - wykładnik funkcji.

Funkcję $Y(t)$ rozpatruje się jako uogólniony parametr zespołu lub układu pojazdu. Parametrami uogólnionymi mogą być parametry wyjściowe, np. dla silnika spalinowego: moc, prędkość obrotowa, zużycie paliwa. Można też jako parametr uogólniony przyjąć pewną funkcję, nie mającą interpretacji fizycznej. Przedstawia się ją wówczas jako zależność matematyczną, do której wprowadza się parametry diagnostyczne $y_j \in Y$. Należy wówczas uwzględnić wagę każdego parametru (wartość funkcji wagi w_j) oraz postać funkcji (wykładnik funkcji λ). Tak sformułowana charakterystyka $Y(t)$, $t \in (t_1, t_b)$ określa proces pogarszania się stanu technicznego urządzenia w przedziale czasu (t_1, t_b) .

Ze względu na sformułowane w rozdziale 1 ustalenia (skokowa zmiana wartości parametrów diagnostycznych, mała liczebność elementów szeregu czasowego) autor proponuje modyfikację metody w dwóch aspektach :

- zwiększenie jej wrażliwości na chwilowe zmiany realizacji procesu pogarszania się stanu technicznego pojazdów, szczególnie po czasie t_b ;
- adaptowanie jej dla przypadku małej liczby obserwacji parametrów diagnostycznych.

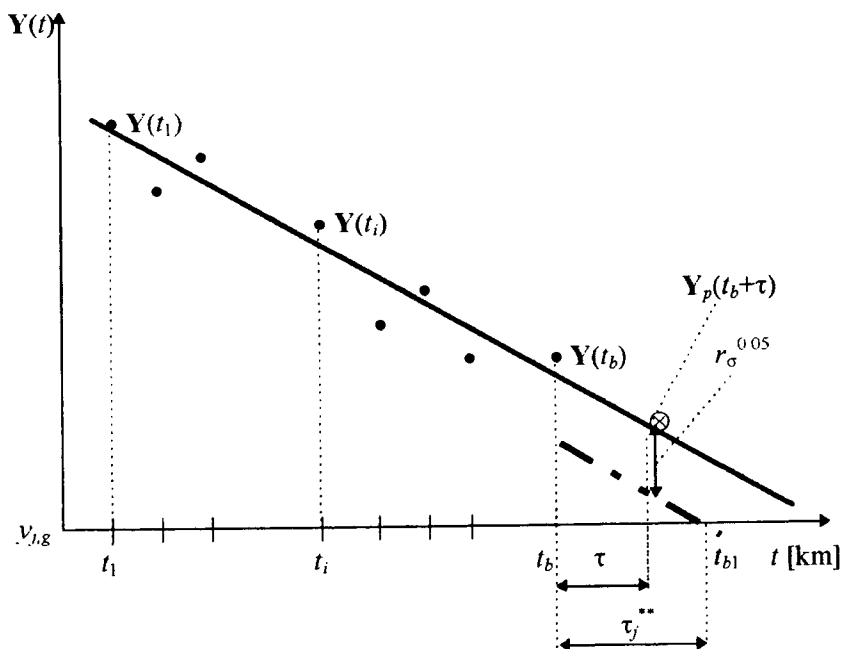
Spełniając powyższe wymagania autor proponuje modyfikację metody w postaci algorytmu:

- na podstawie obserwacji wartości parametrów diagnostycznych w czasie (t_1, t_b) określić wartości charakterystyki $Y(t)$, $t \in (t_1, t_b)$;
- aproxymować charakterystykę $Y(t)$ (dla $\lambda=1$) prostą $Z(t)$ i określić wartość prognozowaną parametru diagnostycznego $Y_p(t_b+\tau) = Z(t_b+\tau)$;
- obliczyć promień granicy przedziału błędu prognozy r_σ

$$r_\sigma(q(K;0,05)) = \frac{q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{i=1}^K e_{p,i}^2}}{\sqrt{K}} \quad (2.18)$$

- d) obliczyć termin kolejnego diagnozowania t_{b1} jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej uogólnionego parametru diagnostycznego $y_{j,g}$ (w tej metodzie stanowi ją oś odciętych) z dolną granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień r_σ (rys.2.3) według wyrażenia:

$$t_{b1} = t_b + \frac{\tau (Z(t_b) - r_\sigma)}{Z(t_b) - Z(t_b + \tau)} \quad (2.19)$$



Rys. 2.3. Wyznaczanie PST metodą $x_{2,1}$

- e) Przeprowadzić badanie w terminie t_{b1} i określić różnicę $e_p(t_{b1})$

$$e_p(t_{b1}) = |Y(t_{b1}) - Z(t_{b1})| \quad (2.20)$$

Wartość średnia tych różnic w następnych krokach t_{bi} , $i = 1, \dots, I$ oraz w czasie $(t_1, \dots, t_i, \dots, t_b)$ stanowi błąd prognozowania e_p dla powyższej metody

$$e_p = \frac{1}{K+I} \sum_{i=1}^{K+I} e_p(t_{bi}) \quad (2.21)$$

Zdaniem autora każdorazowe dołączenie $Y(t_{bi})$ do budowy $Z(t)$ powoduje, że wyznaczona w kolejnym i -tym kroku wartość t_{bi} ma wartość zmienną zależną od pogarszania się stanu technicznego pojazdów.

Metoda funkcji regresji $x_{2,2}$

Istota metody polega na tym, że proces pogarszania się stanu technicznego pojazdów, przy założeniu że rozkład błędu parametru diagnostycznego $y_j(t)$ w stosunku do prostej regresji jest normalny lub zbliżony do normalnego, opisuje się za pomocą mo-

delu regresji liniowej. Wartość prognozowaną parametru diagnostycznego y_p otrzymuje się poprzez szacowanie prostej regresji metodą najmniejszych kwadratów:

$$y_p = at + b \quad (2.22)$$

gdzie:

a, b - estymatory parametrów β i δ liniowej funkcji regresji $y = \beta t + \delta$.

W celu weryfikacji tak oszacowanego modelu regresji liniowej proponuje się, obliczenie kwadratu współczynnika korelacji R^2 i przyjęcie modelu jako dobrze dopasowanego przy wartości $R^2 > 0,8$; w przeciwnym wypadku - rezygnację z metody $x_{2,2}$.

Przedział ufności dla prostej regresji $y = \beta t + \delta$ ograniczony krzywymi ufności autor proponuje przyjąć jako granicę przedziału błędu prognozy, wyznaczoną przez promień przedziału r_σ według wzoru :

$$r_\sigma (q(K;0,05)) = q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{i=1}^K e_{pi}^2} \sqrt{1 + \frac{1}{K} + \frac{(t_i - \bar{t})^2}{\sum_{i=1}^K (t_i - \bar{t})^2}} \quad (2.23)$$

W celu otrzymania prognozy PST proponuje się realizację następującego algorytmu:

- na podstawie danych wartości parametru diagnostycznego y_j w przedziale (t_1, t_b) oszacować metodą najmniejszych kwadratów liniową funkcję regresji liniowej zmiany parametru diagnostycznego,
- określić wartość prognozowaną parametru diagnostycznego $y_{j,p}(t_b + \tau)$,
- obliczyć promień r_σ ,
- obliczyć termin kolejnego diagnozowania t_{b1} jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego $y_{j,g}$ z dolną (przy założeniu, że $y_{j,p}(t_b) > y_{j,g}$) lub górną (przy założeniu, że $y_j(t_b) < y_{j,g}$) granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień r_σ (rys.2.4):

$$\text{dla } y_j(t_b) > y_{j,g} : \quad t_{b1} = t_b + \frac{\tau (y_{j,p}(t_b) - r_\sigma)}{y_{j,p}(t_b) - y_{j,p}(t_b + \tau)} \quad (2.24)$$

$$\text{dla } y_j(t_b) < y_{j,g} : \quad t_{b1} = t_b + \frac{\tau (y_{j,g} - r_\sigma)}{y_{j,p}(t_b + \tau) - y_{j,p}(t_b)}$$

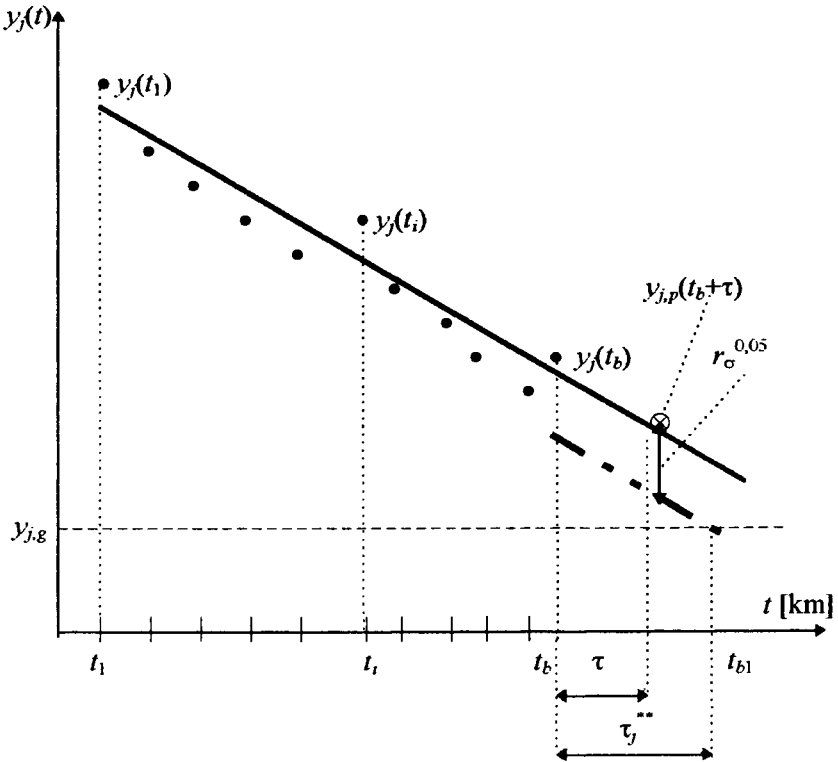
Należy zauważyć, że powyższe wzory zbudowane są przy założeniu, że w przedziale (t_b, t_{b1}) trend parametru y_j będzie w przybliżeniu liniowy;

- przeprowadzić badanie w terminie t_{b1} i określić różnicę $e_p(t_{b1})$:

$$e_p(t_{b1}) = |y_j(t_{b1}) - y_{j,p}(t_{b1})| \quad (2.25)$$

Wartość średnia tych różnic w następujących krokach $t_{bi}, i = 1, \dots, I$ oraz w czasie $(t_1, \dots, t_i, \dots, t_b)$ stanowi błąd prognozowania e_p dla powyższej metody

$$e_p = \frac{1}{K+I} \sum_{i=1}^{K+I} e_p(t_{bi}) \quad (2.26)$$



Rys. 2.4. Wyznaczanie PST metodą $x_{2,2}$

Metoda wyrównywania wykładniczego Browna - Mayera rzędu 1 (model liniowy) $x_{2,3}$

Metoda ta zakłada, że zmienna opisująca proces pogarszania się stanu technicznego zespołu lub układu pojazdu nie wykazuje wahań periodycznych, a jedynie trend i wahania przypadkowe, przy czym trend może ulegać zmianom w czasie.

Model kształtowania się zmiennej $Y(t)$ w czasie zapisuje się w postaci:

$$Y(t) = \mu(t) + \xi(t) \quad (2.27)$$

gdzie:

$\mu(t)$ - funkcja trendu,
 $\xi(t)$ - składnik losowy.

Wartość prognozowaną parametru y_p oblicza się, przy założeniu liniowości trendu zmiennej $Y(t)$, z wyrażenia:

$$y_p = a_t^{(0)} + \tau a_t^{(1)} \quad (2.28)$$

gdzie:

$$a_t^{(0)} = M_t - 2M_t^{(1)} - M_t^{(2)},$$

$$a_t^{(1)} = T_t = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} (M_t^{(1)} - M_t^{(2)}),$$

oraz:

$$M_t^{(1)} = \alpha y_t + (1 - \alpha) M_{t-1}^{(1)},$$

$$M_t^{(2)} = \alpha M_t^{(1)} + (1 - \alpha) M_{t-1}^{(2)},$$

α - parametr wygładzenia wykładniczego, $\alpha \in (0,1)$.

Wartość prognozowana parametru y_p równa się więc najnowszej ocenie trendu powiększonej o przyrost trendu pomnożony przez horyzont prognozy τ . W modelu tym parametr α ustalany jest metodą kolejnych przybliżeń na podstawie analizy danych empirycznych zmiennej $Y(t)$. Za najlepszą uznaje się wartość parametru α , przy której otrzymuje się najmniejsze rozbieżności między rzeczywistymi realizacjami zmiennej $Y(t)$, a obliczonymi prognozowanymi wartościami parametru y_p .

W celu otrzymania PST (2.6) proponuje się realizację następującego algorytmu:

- na podstawie danych wartości parametru diagnostycznego y_j w przedziale (t_1, t_b) określić, według (2.28), wartość prognozowaną $y_{j,p}(t_b + \tau)$;
- obliczyć promień granicy przedziału błędu prognozy r_σ :

$$r_\sigma(q(K;0,05)) \cong ab$$

$$a = q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{i=1}^K e_{p,i}^2} \quad (2.29)$$

$$b = \sqrt{\frac{\alpha}{(1-\alpha)^3} \left[1 + 4(1-\alpha) + 5(1-\alpha)^2 + 2(4-3\alpha)t^2 + 2\alpha^2 t^2 \right]}$$

- obliczyć termin kolejnego diagnozowania t_{b1} jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego $y_{j,g}$ z dolną (przy założeniu, że $y_j(t_b) > y_{j,g}$) lub górną (przy założeniu, że $y_j(t_b) < y_{j,g}$) granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień r_σ (rys.2.5):

$$\text{dla } y_j(t_b) > y_{j,g}: \quad t_{b1} = t_b + \frac{\tau (y_{j,p}(t_b) - r_\sigma)}{y_{j,p}(t_b) - y_{j,p}(t_b + \tau)} \quad (2.30)$$

$$\text{dla } y_j(t_b) < y_{j,g}: \quad t_{b1} = t_b + \frac{\tau (y_{j,g} - r_\sigma)}{y_{j,p}(t_b + \tau) - y_{j,p}(t_b)}$$

Podobnie jak dla (2.24) należy zauważyć, że powyższe wzory zbudowane są przy założeniu, że w przedziale (t_b, t_{b1}) trend parametru y_j będzie w przybliżeniu liniowy;

- przeprowadzić badanie w terminie t_{b1} i określić różnicę $e_p(t_{b1})$

$$e_p(t_{b1}) = |y_j(t_{b1}) - y_{j,p}(t_{b1})| \quad (2.31)$$

Wartość średnia tych różnic w następnych krokach $t_{bi}, i = 1, \dots, I$ oraz w czasie $(t_1, \dots, t_i, \dots, t_b)$ stanowi błąd prognozowania e_p dla powyższej metody

$$e_p = \frac{1}{K+I} \sum_{i=1}^{K+I} e_p(t_{bi}) \quad (2.32)$$

Metoda wyrównywania wykładniczego Browna-Mayera rzędu 2 (model kwadratowy) $x_{2,4}$

Metoda ta, podobnie jak dla modelu liniowego, zakłada, że zmienna opisująca proces pogarszania się stanu technicznego zespołu lub układu pojazdu nie wykazuje wahań periodycznych, a jedynie trend i wahania przypadkowe, przy czym trend może ulegać zmianom w czasie.

Wartość prognozowaną parametru y_p oblicza się z wyrażenia:

$$y_p = a_t^{(0)} + \tau a_t^{(1)} + \tau^2 a_t^{(2)} \quad (2.33)$$

gdzie:

$$a_t^{(0)} = M_t = 3(M_t^{(1)} - M_t^{(2)}) + M_t^{(3)},$$

$$a_t^{(1)} = T_t = \frac{\alpha}{2(1-\alpha)^2} \left\{ (6-5\alpha) M_t^{(1)} - 2(5-4\alpha) M_t^{(2)} + (4-3\alpha) M_t^{(3)} \right\},$$

$$a_t^{(2)} = Q_t = \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)^2} \left\{ M_t^{(1)} - 2M_t^{(2)} + M_t^{(3)} \right\},$$

oraz:

$$M_t^{(1)} = \alpha y_t + (1-\alpha) M_{t-1}^{(1)},$$

$$M_t^{(2)} = \alpha M_t^{(1)} + (1-\alpha) M_{t-1}^{(2)},$$

$$M_t^{(3)} = \alpha M_t^{(2)} + (1-\alpha) M_{t-1}^{(3)},$$

α - parametr wygładzenia wykładniczego, $\alpha \in (0,1)$.

Wartość prognozowana parametru y_p równa się więc najnowszej ocenie trendu powiększonej o przyrost trendu pomnożony przez horyzont prognozy τ (2.33). W modelu tym parametr α ustalany jest też metodą kolejnych przybliżeń na podstawie analizy danych empirycznych zmiennej $Y(t)$. Za najlepszą uznaje się wartość parametru α , przy której otrzymuje się najmniejsze rozbieżności między rzeczywistymi realizacjami zmiennej $Y(t)$ a obliczonymi prognozowanymi wartościami parametru y_p .

W celu otrzymania PST (2.6) proponuje się, podobnie jak dla $x_{2,3}$ realizację następującego algorytmu :

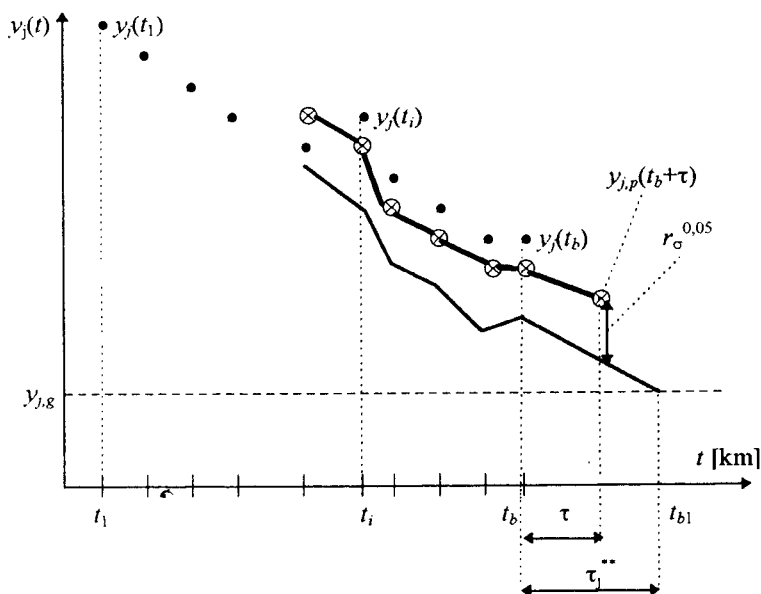
- na podstawie danych wartości parametru diagnostycznego y_j w czasie (t_1, t_b) określić, według (2.33) wartość prognozowaną $y_{j,p}(t_b+\tau)$;
- obliczyć promień r_σ :

$$r_\sigma(q(K;0,05)) \equiv q \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{i=1}^K e_{p,i}^2} \sqrt{2\alpha^2 + 3\alpha^2 + 3\alpha^3 \tau^2} \quad (2.34)$$

- obliczyć termin kolejnego diagnozowania t_{b1} jako punkt przecięcia się linii wartości granicznej parametru diagnostycznego $y_{j,g}$ z dolną (przy założeniu, że $y_j(t_b) > y_{j,g}$) lub górną (przy założeniu, że $y_j(t_b) < y_{j,g}$) granicą przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień r_σ (rys.2.5):

$$\text{dla } y_j(t_b) > y_{j,g} : \quad t_{b1} = t_b + \frac{\tau (y_{j,p}(t_b) - r_\sigma)}{y_{j,p}(t_b) - y_{j,p}(t_b + \tau)} \quad (2.35)$$

$$\text{dla } y_j(t_b) < y_{j,g} : \quad t_{b1} = t_b + \frac{\tau (y_{j,g} - r_\sigma)}{y_{j,p}(t_b + \tau) - y_{j,p}(t_b)}$$



Rys. 2.5. Wyznaczenie PST metodą $x_{2,3}$ i $x_{2,4}$

Podobnie jak dla (2.24) należy zauważyć, że powyższe wzory zbudowane są przy założeniu, że w przedziale (t_b, t_{b1}) trend parametru y_j będzie w przybliżeniu liniowy;

d) przeprowadzić badanie w terminie t_{b1} i określić różnicę $e_p(t_{b1})$:

$$e_p(t_{b1}) = |y_j(t_{b1}) - y_{j,p}(t_{b1})| \quad (2.36)$$

Wartość średnia tych różnic w następnych krokach t_{bi} , $i = 1, \dots, I$ oraz czasie $(t_1, \dots, t_i, \dots, t_b)$ stanowi błąd prognozowania e_p dla powyższej metody

$$e_p = \frac{1}{K+I} \sum_{i=1}^{K+I} e_p(t_{bi}) \quad (2.37)$$

2.3. Kryteria optymalizacji

Ze względu na rozróżnienie w schemacie konstruowania prognozy dwóch oddzielnych zagadnień (wyznaczenie optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych i określenia optymalnej metody prognostycznej) funkcję kryterialną F stanowić będą dwa zbiory funkcji F_1 i F_2 :

F_1 - zbiór funkcji kryterialnych przypisanych dla rozwiązań dopuszczalnych X_1 ,

F_2 - zbiór funkcji kryterialnych przypisanych dla rozwiązań dopuszczalnych X_2 ,

gdzie:

$$F_1 = \{f_{1,i} : X_1 \Rightarrow R^1 \mid i \in I\} \quad (2.38)$$

$$F_2 = \{f_{2,j} : X_2 \Rightarrow R^1 \mid j \in J\} \quad (2.39)$$

2.3.1. Kryteria optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych

Uwzględniając wymagania wynikające z właściwości eksploatacji pojazdu (patrz rozdział 1) autor sformułował wymagania, według których oceniane będą elementy zbioru X_1 . Są to:

1. Parametry diagnostyczne powinny charakteryzować proces pogarszania się stanu zdatności pojazdu i być z nim ściśle związane.
 2. Parametry diagnostyczne powinny być wrażliwe na zmiany zachodzącego procesu pogarszania się zdatności pojazdu.
 3. Liczba parametrów diagnostycznych nie może być zbyt duża, bowiem znaczna ich liczba utrudnia, a niekiedy uniemożliwia, poznanie i określenie procesu pogarszania się stanu technicznego pojazdu.
 4. Parametry diagnostyczne powinny mieć charakter mierzalny.
 5. Muszą istnieć wiarygodne dane statystyczne i analityczne wyróżnianych parametrów.
- Wymagania te znajdują swoje odzwierciedlenie w formułowanych kryteriach F_1 do oceny wybranych parametrów diagnostycznych. Są nimi:

Kryterium zmienności opisane wskaźnikiem zmienności $f_{1,1}$

$$e_j = \frac{S_j}{\bar{y}_j} \quad (2.40)$$

gdzie:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_{j,i} ; \quad S_j = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (y_{j,i} - \bar{y}_j)^2}$$

Wyborowi podlegają te parametry diagnostyczne, dla których spełniona jest nierówność:

$$e_j > \varepsilon \quad (2.41)$$

gdzie ε - arbitralnie przyjęta mała liczba dodatnia, np. $\varepsilon = 0,1$.

Gdy wartość e_j jest niższa od liczby ε , parametr y_j uważa się za quasi-stały i eliminuje z dalszej analizy. Dla pozostałych parametrów oblicza się mierniki d_j :

$$d_j = \frac{e_j}{\sum_{j=1}^J e_j} \quad (2.42)$$

gdzie J oznacza liczbę parametrów diagnostycznych po odrzuceniu parametrów quasi-stałych. Ponieważ:

$$d_j > 0 \quad (2.43)$$

więc d_j można interpretować jako wagi określające relatywne znaczenie poszczególnych parametrów diagnostycznych. Autor proponuje bardziej ostre ograniczenie w postaci maksymalizacji wskaźnika e_j i wybór parametru y^* o największej wartości wskaźnika e_j :

$$y^* = y_{j^*}$$

$$j^* \in 1, \dots, m \wedge e_{j^*} = \max(e_j) \quad (2.44)$$

$$j = 1, \dots, m$$

Kryterium skorelowania parametru diagnostycznego ze stanem technicznym pojazdu $f_{1,2}$

Skorelowanie parametru diagnostycznego y_j ze stanem technicznym W uznaje się za istotne, gdy na podstawie odpowiedniego testu statystycznego (najczęściej t-Studenta) wnioskuje się odrzucenie hipotezy, że wartość współczynnika korelacji liniowej r_j równa jest zero:

$$r_j = r(y_j, W) \quad (2.45)$$

W przypadku braku danych o elementach wektora W można korzystać, jak wykazano w pracy [46], z przebiegu pojazdu T . Wówczas:

$$r_j = r(y_j, T) \quad (2.46)$$

Autor proponuje jednak bardziej ostre ograniczenie w postaci maksymalizacji wskaźnika r_j i wybór parametru diagnostycznego o największej wartości wskaźnika r_j :

$$\begin{aligned} y^* &= y_{j^*} \\ j^* &\in 1, \dots, m \wedge r_{j^*} = \max(r_j) \\ &j=1, \dots, m \end{aligned} \quad (2.47)$$

Kryterium skorelowania parametrów diagnostycznych $f_{1,3}$

Parametry diagnostyczne nie mogą być ze sobą skorelowane, gdyż prowadziłyby to do wielokrotnego powtarzania tej samej informacji o stanie technicznym pojazdu. Wybiera się więc taki parametr y^* , który będzie posiadał minimalną wartość współczynnika korelacji $r_{i,j}$:

$$\begin{aligned} r_{i,j} &= r(y_i, y_j); \quad i, j = 1, \dots, m; \quad i \neq j \\ y^* &= y_{j^*} \\ j^* &\in 1, \dots, m \wedge r_{i,j^*} = \min(r_{i,j}) \\ &i, j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (2.48)$$

Kryterium kosztu diagnozowania $f_{1,4}$

Koszt diagnozowania można wyrazić za pomocą wzoru [9]:

$$K_j = at_3 + bk_3 \quad (2.49)$$

gdzie:

- a, b - współczynniki wagowe kosztów cząstkowych,
- t_3 - czas wykonywania pomiaru,
- k_3 - koszt aparatury badawczej.

Wybiera się taki parametr y^* , który będzie posiadał minimalną wartość wskaźnika kosztu K_j .

2.3.2. Kryteria optymalizacji metod prognozowania

Autor opierając się na wynikach przeprowadzonych badań [92,95] oraz na ustaleniach z rozdziału 1 niniejszej pracy wyróżnił dwie grupy kryteriów zbioru F_2 :

1. Kryteria błędu prognozy, które określają, że prognoza jest dopuszczalna, gdy wartość miar niedokładności prognozy jest mniejsza od ustalonej liczby.

2. Kryteria wiarygodności, które warunkują dopuszczalność prognoz według prawdopodobieństwa pojawiania się zdarzeń uznanych za objaw poprawnie realizowanego procesu prognostycznego, przy czym prawdopodobieństwo to musi być większe od ustalonej liczby.

Do pierwszej grupy zalicza się:

Błąd prognozy $f_{2,1}$

$$e_p = y_p(t) - y(t) \quad (2.50)$$

gdzie:

$y_p(t)$ - prognozowana wartość parametru diagnostycznego y w chwili t ,
 $y(t)$ - wartość parametru w chwili t .

Średni błąd prognozy $f_{2,2}$

$$e_{1,p} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K e_{p,i} \quad (2.51)$$

gdzie: $e_{p,i}$ - błąd prognozy w chwili t_i .

Średni bezwzględny błąd prognozy $f_{2,3}$

$$e_{2,p} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |e_{p,i}| \quad (2.52)$$

Średniokwadratowy błąd prognozy $f_{2,4}$

$$e_{3,p} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K e_{p,i}^2 \quad (2.53)$$

Ogólny względny błąd prognozy $f_{2,5}$

$$e_{4,p} = \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K e_{p,i}^2}{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_i} \quad (2.54)$$

Zespół miar Theila (współczynnik rozbieżności przeciętnego względnego błędu prognozy) $f_{2,6}$

$$U^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^K y_i^2} \sum_{i=1}^K e_{p,i}^2 \quad (2.55)$$

Wskaźnik U^2 przyjmuje wartości z przedziału $\langle 0,1 \rangle$. Dekomponując go otrzymuje się składniki U^2_1 , U^2_2 , U^2_3 . Każdy składnik wynikający z określonej przyczyny jest miarą błędu prognozy:

U^2_1 - wynikający z obciążenia predykcji podaje wartość błędu prognozy;

U^2_2 - umożliwia analizę, czy wahania parametru prognozowanego są dobrze odwzorowane przez wybrany predyktor;

U^2_3 - informuje o błędach wynikłych z niezgodności kierunku zmian ze zmianami kierunku parametru prognozowanego.

Do drugiej grupy zalicza się:

Promień przedziału błędu prognozy $f_{2,7}$

Promień przedziału błędu prognozy wyznacza się ze wzoru:

$$r_{\sigma} = q \sigma \quad (2.56)$$

gdzie:

q - parametr stały wyznaczany z tablicy rozkładu Studenta dla wymaganego poziomu ufności $1 - \gamma$ i $K-2$ stopni swobody np. dla $1 - \gamma = 0.95$ i $K=10$ parametr $q = 2.262$,

σ - odchylenie standardowe składnika losowego błędu prognozy.

W zależności od metody promień przedziału wyrażony jest odpowiednio wzorami 2.23, 2.29, 2.34.

Ocenę przydatności predyktora P należy przeprowadzić na podstawie minimalizacji obliczonych wskaźników, np. dla promienia przedziału błędu prognozy r_{σ} według wyrażenia:

$$P^* = P_{j^*},$$

$$j^* \in 1, \dots, n \wedge r_{\sigma, j^*} = \min (r_{\sigma, j}) \quad (2.57)$$

$$j = 1, \dots, n$$

Dysponując powyższymi zbiorami F_1 i F_2 , należy następnie określić wskaźnik jakości rozwiązania budowy prognozy F jako:

$$F = (F_1, F_2) \quad (2.58)$$

W celu określenia elementów funkcji kryterialnej F przeprowadzono badania [19,20,22] i na podstawie ich wyników przyjęto jako funkcje kryterialne:

$$F_1 = \{f_{1,1}, f_{1,2}\}, \quad F_2 = \{f_{2,6}, f_{2,7}\} \quad (2.59)$$

gdzie:

$f_{1,1}$ - kryterium zmienności parametru diagnostycznego,

$f_{1,2}$ - kryterium skorelowania parametru diagnostycznego ze stanem technicznym pojazdu,

$f_{2,6}$ - kryterium rozbieżności przeciętnego względnego błędu prognozy - zespół miar Theila,

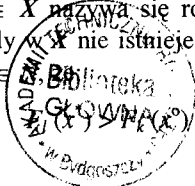
$f_{2,7}$ - promień przedziału błędu prognozy.

2.4. Metoda optymalizacji wielokryterialnej

Opierając się na ustaleniach z rozdziału 1 dotyczących budowy optymalnej prognozy PST^o oraz wnioskach z analizy prac [2,72,107] autor uważa, że najbardziej odpowiednią metodą optymalizacji wielokryterialnej do budowy optymalnej prognozy PST^o jest metoda **optymalizacji w sensie PARETO**. Potwierdza to fakt, że bardzo często używana jest w praktycznych sformułowaniach polioptymalizacji - prace [2,72].

W metodzie tej element $x^o \in X$ nazywa się rozwiązaniem optymalnym w sensie PARETO wtedy i tylko wtedy, gdy w X nie istnieje taki element x^* , że $F_n(x^*) > F(x^o)$ dla każdego $n \in N$ oraz istnieje $k \in N$

$$(2.60)$$



W praktycznych sformułowaniach zadań polioptymalizacji zdarza się często tak, co ma miejsce w niniejszym opracowaniu, że występuje maksymalizacja tylko niektórych wskaźników jakości, pozostałe natomiast minimalizuje się.

Praktyczne zastosowanie rozwiązania optymalnego x^0 determinują postulaty:

- 1) rozwiązanie x^0 powinno być jedyne;
- 2) rozwiązanie x^0 powinno być rozwiązaniem niezdominowanym, o ile zbiór rozwiązań niezdominowanych nie jest pusty (postulat ten spełniają tzw. rozwiązania kompromisowe). Realizowane jest to poprzez zawężenie zbioru elementów optymalnych w sensie PARETO w dwóch aspektach:
 - a) **wyboru punktu idealnego** $a^* \in R^N$, który będzie uważany za najbardziej pożądaną wynik, definiowany w przypadku zadania optymalizacji (X, F, \geq) jako:

$$a^*_n = \sup_{x \in X} F_n(x); n \in N \quad (2.63)$$

- b) **wyboru postaci normy** $R^{a^*}(a)$ wektora $(a^* - a)$ określającego odległość punktu $a \in A$ od punktu idealnego a^* , np. pod postacią znormalizowanego kryterium $F(\bullet)$ o znormalizowanych kryteriach składowych:

$$F^*_n(x) = (F_n(x))(a^* - a_n^{min}), n \in N \quad (2.64)$$

przy czym wartość względnych odchyłek poszczególnych kryteriów powinna być znormalizowana w przedziale $(0,1)$:

$$0 < (a^*_n - F_n(x))(a^* - a_n^{min}) < 1; x \in X, n \in N \quad (2.65)$$

lub pod postacią normy $R(\bullet)$ z parametrem $p \geq 1$, przy czym gdy:

$p = 1$ otrzymuje się sumę ważoną kryteriów cząstkowych,

$p = 2$ otrzymuje się normę euklidesową.

Uzyskany wynik $a^0 \in A$ jest najbliższy wynikowi a^* w sensie „odległości geometrycznej” (np. punkt styczności okręgu o możliwie największym promieniu i środkiem w a^* ze zbiorem A).

Rozwiązania kompromisowe z parametrem $p > 1$ mają szereg własności [1], które powodują, że często są stosowane. A oto najważniejsze z nich:

- a) łączne odchylenie od wyniku idealnego a^* (łączna strata) reprezentowane liczbą $|a^* - a^p|_p$ jest minimalnym odchyleniem, jakie można uzyskać dysponując wynikami ze zbioru A :

$$|a^* - a^p|_p = \inf_{a \in A} |a^* - a^p|_p \quad (2.66)$$

- b) jeśli A jest zbiorem ograniczonym i domkniętym to dla $p > 1$ istnieje niepusty zbiór $A_p^{a^*}$;
- c) wynik $a^p \in A$ jest wynikiem „pośrednim” - wpływ wszystkich kryteriów $F_n(\bullet)$ na wybór ostatecznego rozwiązania $F^{-1}(a^p)$ jest uwzględniony („nie ma żadnej dyktatury”); odmiennie niż prezentują to inne rozwiązania, np. rozwiązanie leksykograficzne;
- d) dla $1 \leq p \leq \infty$, zbiór $A_p^{a^*}$ jest podzbiorem zbioru A_N^{\geq} wyników niezdominowanych w sensie PARETO, zatem każde rozwiązanie kompromisowe $1 \leq p \leq \infty$, jest optymalne w sensie PARETO;
- e) jeśli zbiór A jest Δ - wypukły, to dla $1 < p < \infty$ zbiór A_p^{\geq} jest jednoelementowy.

Ponadto parametr p pozwala wypośrodkować wpływ na wybór ostatecznego rozwiązania potrzeby wzrostu użyteczności grupowej, jak też konieczność zmniejszenia strat indywidualnych poszczególnych kryteriów. Wybór wartości parametru p uzależniony jest więc od tego, czy w danej sytuacji decyzyjnej bardziej preferuje się „użyteczność grupową”, czy „indywidualne pojedyncze” kryteria, co stanowi pewien kompromis. Z tego też względu określono wartość parametru jako $p=2$.

Przedstawione powyżej własności rozwiązań kompromisowych determinują ich dużą użyteczność praktyczną w rozwiązywaniu zadań polioptymalizacji, co potwierdza też fakt częstego ich wykorzystania w praktycznych sformułowaniach polioptymalizacji [2]. Z tego też względu zostały wybrane do rozwiązania zadania optymalizacji wielokryterialnej wyznaczania optymalnej prognozy (PST^o).

2.5. Podsumowanie i wnioski

Reasumując przeprowadzone w rozdziale rozważania na temat konstruowania optymalnej prognozy (PST^o) stwierdza się, że:

1. Opracowano sposób wyznaczenia składników prognozy $PST = \langle \mathcal{U}_{b1}, e_p, r_\sigma \rangle$.
2. Opracowano schemat wyznaczania optymalnej prognozy (PST^o).
3. Opracowano, wykorzystując częściowo znane metody, zbiory rozwiązań dopuszczalnych;
 - a) X_1 - zbiór metod wyboru parametrów diagnostycznych,
 - b) X_2 - zbiór metod prognozowania.
4. Ustalono i wybrano kryteria optymalizacji rozwiązań dopuszczalnych X_1 i X_2 .
5. Ustalono metodę optymalizacji wielokryterialnej do wyznaczenia optymalnej prognozy (PST^o) dla układów i zespołów pojazdu mechanicznego. Jest nią rozwiązanie kompromisowe zadania optymalizacji z parametrem $p = 2$.

ROZDZIAŁ 3

OPTIMALIZACJA WYZNACZANIA PROGNOZY STANU TECHNICZNEGO POJAZDÓW MECHANICZNYCH

Sformułowanie zagadnienia wyboru optymalnego rozwiązania wyznaczenia prognozy PST^o, w myśl (2.60) przedstawia się następująco.

Oznaczając:

A - przestrzeń rozwiązań ,

B - przestrzeń ocen rozwiązań,

$F : A \Rightarrow B$ - funkcją kryterium, przyporządkowującą każdemu rozwiązaniu $X \subset A$ jego ocenę $Z \in B$

i przy założeniu, że zbiór możliwych rozwiązań A nie jest pusty, można wybrać pewien podzbiór X (tzw. zbiór rozwiązań dopuszczalnych), przy czym:

$$Z = F(X) = \{F(x) \in B \mid x \in X\} \quad (3.1)$$

Aby można było mówić o wyborze „rozwiązania optymalnego”, należy określić pojęcie „rozwiązanie lepsze” („rozwiązanie gorsze”) od pewnego zadanego rozwiązania $z \in B$. Dokonuje się to poprzez wprowadzenie tzw. relacji dominowania $\Phi \subset B \times B$.

Po określeniu zbioru X , funkcji odwzorowania F (rozdział 2) i relacji Φ , wykorzystując prace [3,70], sformułowano zadanie optymalizacji w postaci:

$$(X, F, \Phi) \quad (3.2)$$

Do dalszych rozważań można przyjąć jeszcze bardziej skrócony zapis zadania optymalizacji:

$$(Z, \Phi) \quad (3.3)$$

gdź $Z = F(X)$.

Dysponując relacją dominowania Φ w oparciu o przyjętą formułę optymalności (np. jako zbiór rozwiązań dominujących lub niezdominowanych) wyznacza się zbiór ocen „najlepszych”:

$$Z(\Phi) = Z^* \subset Z \quad (3.4)$$

a następnie wyznacza się jego przeciwobraz

$$X = F^{-1}(Z^*) = \{x^* \in X \mid F(x^*) \in Z^*\} \quad (3.5)$$

jako odpowiadający jemu zbiór decyzji „najlepszych”.

Zagadnienie ustalenia w trakcie formułowania zadania optymalizacji odpowiedniej relacji dominowania jest zadaniem trudnym, konkretna postać relacji wynika bowiem z subiektywnego stosunku podejmującego decyzje do ich oceny.

Przyjmując założenie o potrzebie porządku wprowadzonym przez relację dominowania Φ , tzn. przyjęcie że Φ jest co najmniej zwrotna i przechodnia, konkretną postać relacji w ogólnym przypadku wybiera się ze zbioru [3]:

$$R(B) = 2^{B \times B} \quad (3.6)$$

wszystkich możliwych relacji dominowania taką, która odpowiada najbardziej modelowanej sytuacji decyzyjnej i uwzględnia preferencje decydenta, np. koszt pomiaru parametru diagnostycznego dla użytkownika pojazdu może być mniej istotny niż ilość informacji, jaką niesie parametr diagnostyczny o stanie układu lub zespołu pojazdu.

Dysponując określoną relacją dominowania i wykorzystując zaproponowaną w punkcie 2.3 metodę optymalizacji, określa się procedurę postępowania, prowadzącą do rozwiązania optymalnego.

3.1. Zadanie optymalizacyjne wyznaczania prognozy

Zadanie optymalizacji wyznaczania PST^o przedstawia się jako parę zadań polioptrymalizacji:

$$(X_1, F_1, \Phi_1), \quad (X_2, F_2, \Phi_2) \quad (3.7)$$

gdzie:

$X_1 = \{x_{1,1}, \dots, x_{1,n}\}$ - zbiór metod wyboru parametrów diagnostycznych,

$X_2 = \{x_{2,1}, \dots, x_{2,n}\}$ - zbiór metod prognozowania;

F_1 - funkcja kryterialna wyboru parametrów diagnostycznych $F_1: X_1 \Rightarrow R^2$

$$F_1(X_1) = (f_{1,1}(X_1), f_{1,2}(X_1)) \quad (3.8)$$

przy czym funkcje cząstkowe posiadają strukturę preferencji:

$F_1(X_1)$: (max, max);

F_2 - funkcja kryterialna wyboru metod prognozowania $F_2: X_2 \Rightarrow R^2$

$$F_2(X_2) = (f_{2,6}(X_2), f_{2,8}(X_2)) \quad (3.9)$$

przy czym funkcje cząstkowe posiadają strukturę preferencji:

$F_2(X_2)$: (min, min);

Φ_1 - relacja dominowania zadania optymalizacyjnego określenia zbioru parametrów diagnostycznych

$$\Phi_1 = \{(c_1, c_2) \in C \times C : c_1^1 \geq c_2^1 \wedge c_1^2 \geq c_2^2\} \quad (3.10)$$

gdzie:

C - obraz zbioru X_1 przy odwzorowaniu F_1 ,

c_1, c_2 - punkty przestrzeni C :

$$C = F_1(X_1) = \{(f_{1,1}(x), f_{1,2}(x)) \in R^2 : x \in X_1\} \quad (3.11)$$

Φ_2 - relacja dominowania zadania optymalizacyjnego wyboru metod prognozowania

$$\Phi_2 = \{(d_1, d_2) \in D \times D : d_1^1 \leq d_2^1 \text{ i } d_1^2 \leq d_2^2\} \quad (3.12)$$

gdzie:

D - obraz zbioru X_2 przy odwzorowaniu F_2 ,

d_1, d_2 - punkty przestrzeni D :

$$D = F_2(X_2) = \{(f_{2,6}(x), f_{2,8}(x)) \in R^2 : x \in X_2\} \quad (3.13)$$

Z przyjętej postaci relacji dominowania Φ wynika, że rozpatrywane zadanie polioptymalizacji należy do grupy zadań z tzw. dominowaniem stożkowym. W ogólnym przypadku postać relacji dominowania w przestrzeni kryterialnej $Z = (C, D)$ wynika z subiektywnego stosunku do poszczególnych rozwiązań osoby podejmującej decyzję.

Jest też wyrazem preferencji niektórych wskaźników ocenowych nad innymi. W rozpatrywanym przypadku będą to:

- 1) dla wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych:
 - a) zmienność parametrów w czasie eksploatacji pojazdu $(f_{1,1})$,
 - b) korelacja parametrów diagnostycznych ze stanem technicznym zespołów $(f_{1,2})$;
- 2) dla wyboru optymalnej metody prognozowania:
 - a) miara dokładności prognozy $(f_{2,6})$,
 - b) wiarygodność prognozy $(f_{2,8})$.

Zadanie optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych (X_1, F_1, Φ_1) , jak też zadanie optymalizacji wyboru metod prognostycznych (X_2, F_2, Φ_2) , sformułowane powyżej, są zadaniami optymalizacji dwukryterialnej charakteryzującymi się dyskretnym i skończonym zbiorem rozwiązań dopuszczalnych X_1 i X_2 . Funkcje kryterialne F_1 i F_2 oraz elementy zbiorów rozwiązań dopuszczalnych określono w rozdziale 2 pracy.

Na podstawie wniosków z analizy prac [3,70,85] oraz wyników badań metodyki rozwiązywania zadań polioptymalizacji [94] przyjęto, że rozwiązanie sformułowanego zadania będzie polegać na wyznaczeniu :

- a) zbioru rozwiązań dominujących X_D^Φ ,
- b) zbioru rozwiązań niezdominowanych X_N^Φ ,
- c) zbioru rozwiązań kompromisowych X_K^Φ .

Rozwiązywane zadania polioptymalizacji przyjmują zatem niżej przedstawioną postać.

3.1.1. Zadanie optymalizacyjne wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych

Niech zadaniem optymalizacyjnym wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych będzie:

$$(X_1, F_1, \Phi_1) \quad (3.14)$$

gdzie:

X_1 - zbiór rozwiązań dopuszczalnych określony jako

$$X_1 = \{x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}, x_{1,4}\} \quad (3.15)$$

F_1 - wskaźnik jakości określony jako $F_1 : X_1 \Rightarrow R^2$

$$F_1(X_1) = (f_{1,1}(x), f_{1,2}(x)) \quad (3.16)$$

Φ_1 - relacja dominowania określona zależnością (3.10).

W celu wyznaczenia zbioru rozwiązań dominujących $X_D^{\Phi_1}$ zadania polioptymalizacji, należy znaleźć iloczyn następujących zbiorów X_1^1 i X_1^2 :

$$X_1^1 = \{x^* \in X_1 : f_{1,1}(x^*) = \max_{x \in X_1} f_{1,1}(x)\} \quad (3.17)$$

$$X_1^2 = \{x^* \in X_1 : f_{1,2}(x^*) = \max_{x \in X_1} f_{1,2}(x)\} \quad (3.18)$$

gdzie wielkości $f_{1,1}(x)$, $f_{1,2}(x)$ są określone zależnościami odpowiednio (2.40) i (2.45).

W związku z powyższym należy rozwiązać dwa zadania :

– zmaksymalizować funkcję

$$f_{1,1}(x) = e_j(x), \quad x \in X_1 ; j = 1, \dots, n \quad (3.19)$$

– zmaksymalizować funkcję

$$f_{1,2}(x) = r_j(x), \quad x \in X_1 ; j = 1, \dots, n \quad (3.20)$$

Następnie wyznaczyć zbiory X_1^1 i X_1^2 :

$$X_1^1 = \{x^* \in X_1 : e_j(x^*) = \max_{x \in X_1} e_j(x)\} \quad (3.21)$$

$$X_1^2 = \{x^* \in X_1 : r_j(x^*) = \max_{x \in X_1} r_j(x)\} \quad (3.22)$$

oraz zbiór rozwiązań dominujących jako iloczyn zbiorów X_1^1 i X_1^2

$$X_D^{\Phi 1} = X_1^1 \cap X_1^2$$

W przypadku gdy zbiór $X_D^{\Phi 1}$ jest pusty, wyznacza się zbiór rozwiązań niezdominowanych $X_N^{\Phi 1}$ i zbiór rozwiązań kompromisowych $X_K^{\Phi 1}$.

Zgodnie z uwagami zawartymi w punkcie 2.3 maksymalna wartość funkcji (3.21) i maksymalna wartość funkcji (3.22) wyznaczają współrzędne punktu idealnego $c^* = (c_1^*, c_2^*)$:

$$c_1^* = \max_{x \in X_1} e_j(x) \quad c_2^* = \max_{x \in X_1} r_j(x) \quad (3.23)$$

Z przyjętej postaci funkcji kryterium $F_1 = \{f_{1,1}, f_{1,2}\}$ wynika, że dla c^* żąda się maksymalnej wartości współczynnika zmienności parametru diagnostycznego e_j oraz także żąda się maksymalnej wartości współczynnika korelacji parametru diagnostycznego ze stanem technicznym zespołów pojazdu r_j . W dalszych rozważaniach wykorzystany będzie znormalizowany wskaźnik jakości rozwiązania zadania (3.14), który dla kryteriów maksymalizowanych, za pracą [85], autor proponuje przyjąć jako:

$$F_1^*(x) = \{f_{1,1}^*(x), f_{1,2}^*(x)\} \quad (3.24)$$

gdzie:

$$f_{1,1}^*(x) = \frac{f_{1,1}(x)}{c_1^{\max}}, \quad f_{1,2}^*(x) = \frac{f_{1,2}(x)}{c_2^{\max}} \quad (3.25)$$

przy czym:

$$c_1^{\max} = \max_{x \in X_1} f_{1,1}(x), \quad c_2^{\max} = \max_{x \in X_1} f_{1,2}(x) \quad (3.26)$$

Zaletą tego sposobu normalizacji jest zachowanie proporcji po normalizacji. Najwyższa wartość wskaźnika wynosi 1, najniższa zaś jest większa lub równa 0. Znormalizowany punkt idealny ma wówczas postać:

$$c^{**} = (c_1^{**}, c_2^{**}) \quad (3.27)$$

Ze względu na postać zbioru rozwiązań dopuszczalnych X_1 (dyskretność) do wyznaczenia zbioru wyników niezdominowanych $C_N^{\Phi_1}$ zadania (3.14), a tym samym zbioru jego rozwiązań niezdominowanych $X_N^{\Phi_1}$ i kompromisowych $X_K^{\Phi_1}$, autor proponuje za pracą [1] metodę wyznaczania przybliżonego wyniku (a zatem i rozwiązania) kompromisowego dla normy $|\bullet|$, która jest miarą odległości wyników $c^* \in C^*$ od punktu idealnego c^{**} .

Niech c^{**} oznacza punkt idealny wyznaczony zależnością (3.27) oraz C^* znany zbiór wyników unormowanych:

$$C^* = \{c^{*i}\}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.28)$$

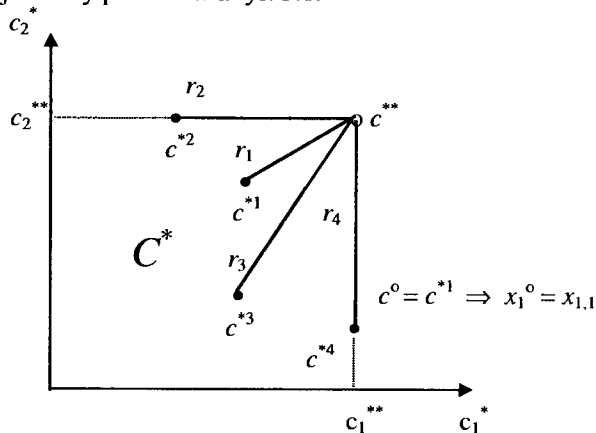
gdzie $c^{*i} = (c_1^{*i}, c_2^{*i})$, przy czym:

$$c_1^{*i} = \frac{c_1^i}{c_1^{\max}}, \quad c_2^{*i} = \frac{c_2^i}{c_2^{\max}} \quad (3.29)$$

W celu określenia kompromisowych wyników „paretoptymalnych” proponuje się obliczenie wartości normy $|\bullet|$ z parametrem $p = 2$:

$$r_i = |c^{**} - c^{*i}|_2 = \sqrt{(c_1^{**} - c_1^{*i})^2 + (c_2^{**} - c_2^{*i})^2} \quad (3.30)$$

i wybór takiego wyniku c^o , który minimalizowałby obliczone wartości norm r_i . Interpretację powyższej metody przedstawia rys. 3.1.



Rys 3.1. Interpretacja graficzna rozwiązania zadania (3.14)

3.1.2. Zadanie optymalizacyjne wyboru metody prognozowania

Niech zadaniem optymalizacyjnym wyboru metody prognozowania będzie:

$$(X_2, F_2, \Phi_2) \quad (3.31)$$

gdzie:

X_2 - zbiór rozwiązań dopuszczalnych określony jako

$$X_2 = \{x_{2,1}, x_{2,2}, x_{2,3}, x_{2,4}\} \quad (3.32)$$

F_2 - wektorowy wskaźnik jakości określony jako $F_2 : X_2 \Rightarrow R^2$

$$F_2(X_2) = (f_{2,6}(x), f_{2,7}(x)) \quad (3.33)$$

gdzie kryteria cząstkowe $f_{2,6}(x)$ i $f_{2,7}(x)$ określone są zależnościami (2.55) i (2.56);

Φ_2 - relacja dominowania określona zależnością (3.12).

Analogicznie jak dla zadania (3.14), w celu wyznaczenia zbioru rozwiązań dominujących $X_D^{\Phi^2}$ zadania polioptymalizacji należy znaleźć iloczyn zbiorów X_2^1 i X_2^2

$$X_2^1 = \{x^* \in X_2 : f_{2,6}(x^*) = \min_{x \in X_2} f_{2,6}(x)\} \quad (3.34)$$

$$X_2^2 = \{x^* \in X_2 : f_{2,7}(x^*) = \min_{x \in X_2} f_{2,7}(x)\} \quad (3.35)$$

W związku z powyższym należy zminimalizować funkcję

$$f_{2,6}(x) = U^2(x), \quad x \in X_2 \quad (3.36)$$

oraz zminimalizować funkcję

$$f_{2,7}(x) = r_\sigma(x), \quad x \in X_2 \quad (3.37)$$

Następnie wyznaczyć zbiory X_2^1 i X_2^2 :

$$X_2^1 = \{x^* \in X_2 : U^2(x^*) = \min_{x \in X_2} U^2(x)\} \quad (3.38)$$

$$X_2^2 = \{x^* \in X_2 : r_\sigma(x^*) = \min_{x \in X_2} r_\sigma(x)\} \quad (3.39)$$

oraz zbiór rozwiązań dominujących jako iloczyn zbiorów X_2^1 i X_2^2

$$X_D^{\Phi^2} = X_2^1 \cap X_2^2$$

W przypadku gdy zbiór $X_D^{\Phi^2}$ jest pusty, wyznacza się zbiór rozwiązań niezdominowanych $X_N^{\Phi^1}$ i zbiór rozwiązań kompromisowych $X_K^{\Phi^2}$.

Zgodnie z uwagami zawartymi w punkcie 2.3 minimalna wartość funkcji (3.36) i minimalna wartość funkcji (3.37) wyznaczają współrzędne punktu idealnego $d^* = (d_1^*, d_2^*)$:

$$d_1^* = \min_{x \in X_2} U^2(x), \quad d_2^* = \min_{x \in X_2} r_\sigma(x) \quad (3.40)$$

Z przyjętej postaci funkcji kryterium $F_2 = \{f_{2,6}, f_{2,7}\}$ wynika, że dla d^* żąda się minimalnej wartości współczynnika rozbieżności przeciętnego względnego błędu prognoz (współczynnika Theila) oraz także żąda się minimalnej wartości promienia r_σ .

Analogicznie jak dla zadania (3.14) w dalszych rozważaniach wykorzystuje się znormalizowany wskaźnik jakości, jako:

$$F_2^*(x) = \{f_{2,6}^*(x), f_{2,7}^*(x)\} \quad (3.41)$$

gdzie:

$$f_{2,6}^*(x) = \frac{d_1^{\min}}{f_{2,6}(x)}, \quad f_{2,7}^*(x) = \frac{d_2^{\min}}{f_{2,7}(x)} \quad (3.42)$$

przy czym:

$$d_1^{\min} = \min_{x \in X_2} f_{2,6}(x), \quad d_2^{\min} = \min_{x \in X_2} f_{2,7}(x) \quad (3.43)$$

Znormalizowany punkt idealny ma wówczas postać:

$$d^{**} = (d_1^{**}, d_2^{**}) \quad (3.44)$$

Analogicznie więc jak dla zadania (3.14) do wyznaczania przybliżonego wyniku (a zatem i rozwiązania) kompromisowego wykorzystuje się metodę wyznaczania przybliżonego wyniku (a zatem i rozwiązania) kompromisowego dla normy $|\bullet|$, która jest miarą odległości wyników $d^* \in D^*$ od punktu idealnego d^{**} .

Niech d^{**} oznacza punkt idealny wyznaczony zależnością (3.44) oraz D^* znany zbiór wyników unormowanych:

$$D^* = \{d^{*i}\}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.45)$$

gdzie:

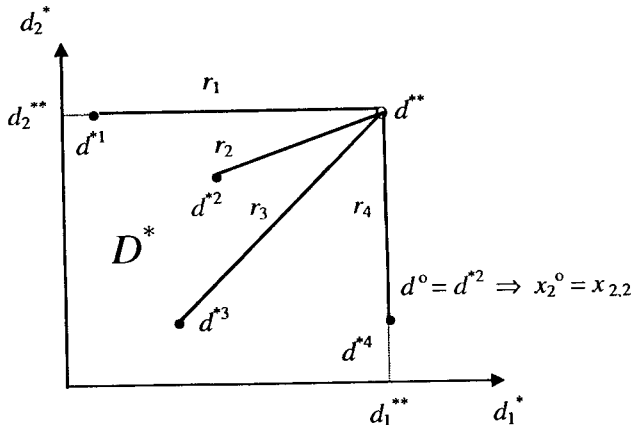
$$d^{*i} = (d_1^{*i}, d_2^{*i})$$

$$d_1^{*i} = \frac{d_1^{\min}}{d_1^i}, \quad d_2^{*i} = \frac{d_2^{\min}}{d_2^i} \quad (3.46)$$

W celu określenia kompromisowych wyników „paretooptimalnych” proponuje się, podobnie jak dla zadania (3.14), obliczenie wartości normy $|\bullet|$ z parametrem $p = 2$

$$r_i = |d^{**} - d^{*i}|_2 = \sqrt{(d_1^{**} - d_1^{*i})^2 + (d_2^{**} - d_2^{*i})^2} \quad (3.47)$$

i wybór takiego wyniku d^0 , który minimalizowałby obliczone wartości norm r_i (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Interpretacja graficzna rozwiązania zadania (3.31)

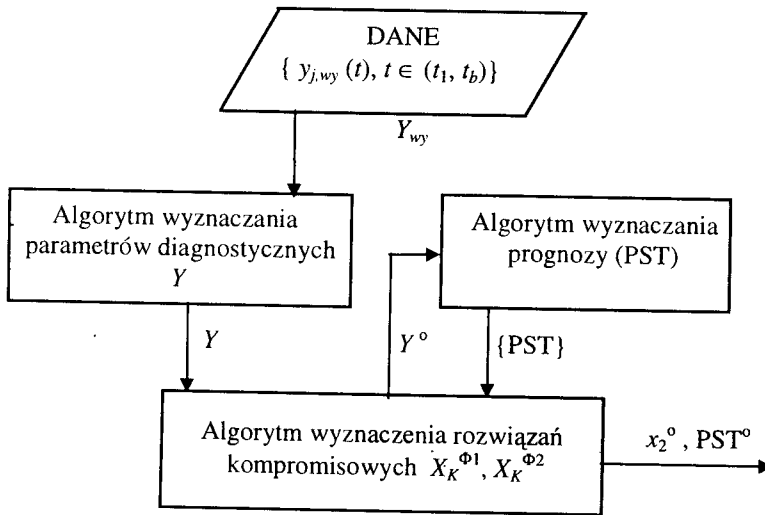
3.2. Algorytm wyznaczania optymalnej prognozy

Opracowane procedury uzyskiwania optymalnej prognozy (PST^o), ze względu na konieczność wspomaganie komputerowego tego procesu, należy poddać algorytmizacji. W tym celu przedstawiono tu ogólny schemat algorytmizacji wyznaczania PST^o i scharakteryzowano poszczególne jego etapy.

Podczas wyznaczania PST^o dla pojazdów mechanicznych występują pewne czynności w odpowiedniej kolejności. Zgodnie z wnioskami z rozdziału 2 najważniejsze to:

- wyznaczenie optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych,
- wybór optymalnej metody prognozowania.

Z tego względu algorytmizacja wyznaczania PST^o zawiera następujące etapy (rys.3.3):



Rys. 3.3. Schemat wyznaczania optymalnej prognozy (PST^o)

1. Wyznaczenie zbioru parametrów diagnostycznych dla przedstawionych metod wyboru, będących rozwiązaniami dopuszczalnymi $x \in X_1$.
2. Wyznaczenie prognozy według przedstawionych metod prognozowania, będących rozwiązaniami dopuszczalnymi $x \in X_2$.
3. Wyznaczenie rozwiązań kompromisowych zadań optymalizacji (3.14) i (3.31) według norm (3.30) (3.47).

1. Etap 1

Algorytm przedstawiony w tym etapie jest związany z metodami wyboru parametrów diagnostycznych prezentowanymi jako rozwiązania dopuszczalne X_1 zadania optymalizacji (3.14). Zawiera on następujące elementy funkcjonalne:

- wczytanie wartości parametrów wyjściowych $\{y_{j,wy}(t), t \in (t_1, t_b)\}$,
- wyznaczenie zbioru parametrów diagnostycznych na poziomie układu lub zespołu pojazdu według różnych metod (rozwiązań dopuszczalnych $x \in X_1$),
- obliczenie wartości funkcji kryterialnej $F_1(X_1)$,

- obliczenie unormowanych wartości funkcji kryterialnej $F_1^*(X_1)$,
- wydruk obliczonych wielkości,
- założenie zbioru obliczonych wielkości.

2. Etap 2

Algorytm przedstawiony w tym etapie jest związany z metodami prognozowania prezentowanymi jako rozwiązania dopuszczalne X_2 zadania optymalizacji (3.31). Zawiera on następujące elementy funkcjonalne :

- wczytanie wartości parametrów diagnostycznych $\{y_j(t), t \in (t_1, t_b)\}$,
- określenie prognozy (wartość prognozowana parametrów diagnostycznych $\{y_{j,p}(t)\}$, termin następnego diagnozowania urządzenia t_b , błąd prognozy e_p , promień r_σ na poziomie układu lub zespołu pojazdu według różnych metod - rozwiązań dopuszczalnych $x \in X_2$),
- obliczenie wartości funkcji kryterialnej $F_2(X_2)$,
- obliczenie unormowanych wartości funkcji kryterialnej $F_2^*(X_2)$,
- wydruk obliczonych wielkości,
- założenie zbioru obliczonych wielkości.

3. Etap 3

Algorytm etapu związany jest z prezentowaną metodą wyznaczenia rozwiązań kompromisowych $X_K^{\Phi 1}$, $X_K^{\Phi 2}$ zadań optymalizacji (3.14) i (3.31). Zawiera on następujące elementy funkcjonalne (rys.3.4):

- wczytanie unormowanych wartości funkcji kryterialnych $F_1^*(X_1)$, $F_2^*(X_2)$,
- wyznaczenie zbiorów rozwiązań dominujących $X_D^{\Phi 1}$, $X_D^{\Phi 2}$,
- wyznaczenie (gdą zbiór rozwiązań dominujących jest pusty) punktów idealnych c^{**} , d^{**} ,
- wyznaczenie według norm (3.30) i (3.47) zbiorów rozwiązań kompromisowych $X_K^{\Phi 1}$, $X_K^{\Phi 2}$,
- wydruk obliczonych wielkości,
- założenie zbioru obliczonych wielkości.

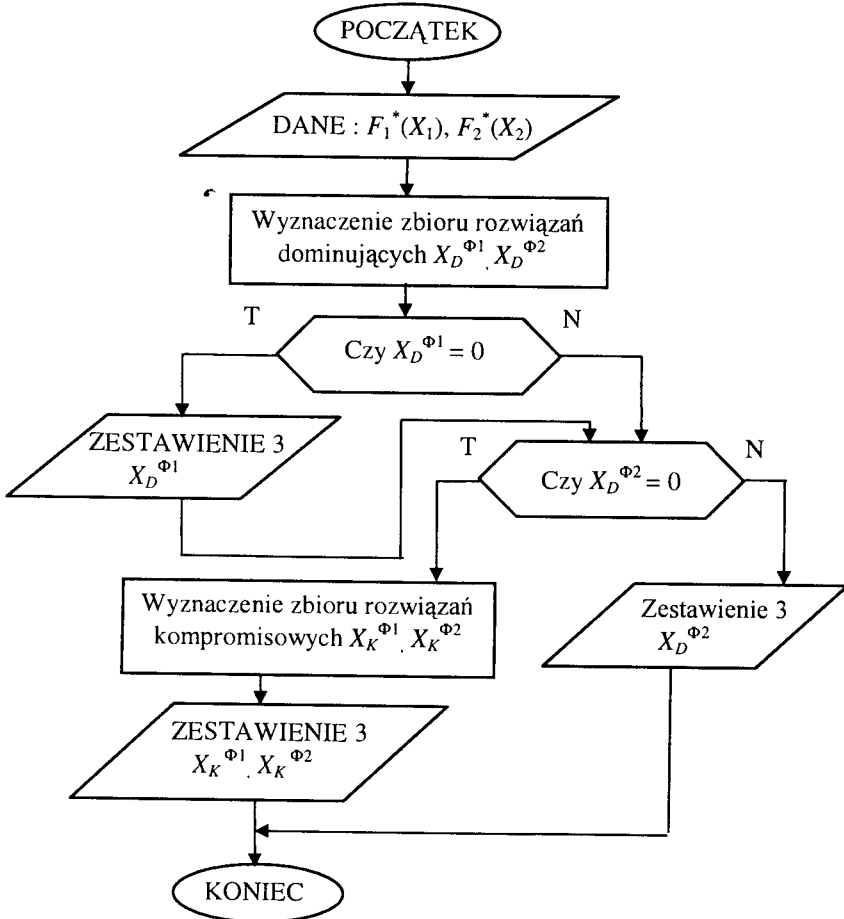
Do realizacji przedstawionych algorytmów opracowano następujące programy:

1. Dla etapu 1 - program # PD (Parametry Diagnostyczne)

W programie #PD wyróżnia się program główny oraz podprogramy: P11, P12, P13, P14, FKRI.

- Program główny - wczytuje dane wejściowe i steruje pracą podprogramów w sposób zapewniający realizację wyznaczenia zbioru parametrów diagnostycznych. Dostarcza wydruków obliczonych wielkości oraz zapamiętuje je w postaci zbioru „PD nr”, gdzie „nr” oznacza numer układu lub zespołu pojazdu.
- Podprogram P11 - realizuje wyznaczenie parametrów diagnostycznych według metody maksymalnej wrażliwości będącej rozwiązaniem dopuszczalnym $x_{1,1}$.
- Podprogram P12 - realizuje wyznaczenie parametrów diagnostycznych według metody maksymalnej zmiany stanu technicznego będącej rozwiązaniem dopuszczalnym $x_{1,2}$.
- Podprogram P13 - realizuje wyznaczenie parametrów diagnostycznych według metody maksymalnej ilości informacji parametru diagnostycznego będącej rozwiązaniem dopuszczalnym $x_{1,3}$.

- Podprogram P14 - realizuje wyznaczenie parametrów diagnostycznych według metody maksymalnej zmienności parametru diagnostycznego będącej rozwiązaniem dopuszczalnym $x_{1,4}$.
- Podprogram FKR1 - realizuje obliczenie wartości funkcji kryterialnej $F_1(X_1)$ oraz przeprowadza ich normalizację.



Rys. 3.4. Algorytm wyznaczenia rozwiązań kompromisowych zadań optymalizacyjnych (3.14) i (3.31)

2. Dla etapu 2 - program # MP (Metody Prognozowania)

W programie #MP wyróżnia się program główny oraz podprogramy: P21, P22, P23, FKR2.

- Program główny - wczytuje dane wejściowe i steruje pracą podprogramów w sposób zapewniający realizację wyznaczenia prognozy. Dostarcza wydruków obliczonych wielkości oraz zapamiętuje je w postaci zbioru „MP nr”, gdzie „nr” oznacza numer układu lub zespołu pojazdów.

- Podprogram P21 - realizuje wyznaczanie prognozy według metody parametru uogólnionego będącej rozwiązaniem dopuszczalnym $x_{2,1}$.
- Podprogram P22 - realizuje wyznaczanie prognozy według metody funkcji regresji będącej rozwiązaniem dopuszczalnym $x_{2,2}$.
- Podprogram P23 - realizuje wyznaczanie prognozy według metody wyrównywania wykładniczego rzędu 1 będącej rozwiązaniem dopuszczalnym $x_{2,3}$.
- Podprogram P24 - realizuje wyznaczanie prognozy według metody wyrównywania wykładniczego rzędu 2 będącej rozwiązaniem dopuszczalnym $x_{2,4}$.
- Podprogram FKR2 - realizuje obliczenie wartości funkcji kryterialnej $F_2(X_2)$ oraz przeprowadza ich normalizację.

3. Dla etapu 3 - program #WOM (Wybór Optymalnej Metody)

W programie #WOM wyróżnia się program główny oraz podprogramy: RD i RK.

- Program główny - wczytuje dane wejściowe w postaci unormowanych wartości funkcji kryterialnej $F_1(X_1)$ i $F_2(X_2)$. Steruje pracą podprogramów w sposób zapewniający realizację rozwiązania zadań (3.14) i (3.31). Dostarcza wydruków obliczonych wielkości oraz zapamiętuje je w postaci zbioru „OP nr” , gdzie „nr” oznacza numer układu lub zespołu pojazdu.
- Podprogram RD - realizuje wyznaczanie rozwiązań dominujących.
- Podprogram RK - realizuje wyznaczanie rozwiązań kompromisowych według norm (3.30) i (3.47).

3.3. Wrażliwość optymalnej prognozy stanu technicznego

Prognozowanie stanu technicznego pojazdów na podstawie przedstawionego modelu (2.1, 2.2, 2.3), odnoszące się do dłuższego okresu wiąże się z ryzykiem, że prognoza (PST) oparta będzie na modelu zdezaktualizowanym, a więc takim, którego elementy (optymalny zbiór parametrów diagnostycznych i optymalna metoda prognozowania) nie odzwierciedlają już rzeczywistych związków między stanem technicznym układów lub zespołów pojazdu a prognozą. Optymalna prognoza powinna być wrażliwa na zmiany stanu technicznego w całym okresie prognozowania stanu technicznego pojazdu i stąd konieczność badania jej wrażliwości na czynniki charakterystyczne dla eksploatacji pojazdu mechanicznego.

Schemat wyznaczania prognozy, według ustaleń poczynionych w punkcie 2.1, składa się z etapów:

- a) wyznaczania optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych;
- b) wyboru optymalnej metody prognozowania;
- c) oceny jakości PST^o.

Pomiędzy wymienionymi etapami istnieje związek, który przejawia się w tym, że każdy poprzedni etap wpływa na następny, toteż chcąc poddać analizie wrażliwość prognozy, należy odnieść ją zarówno do poszczególnych etapów, jak również uwzględnić ją w występujących między nimi zależnościach.

Zjawiska zużycia zespołów pojazdu mechanicznego są bardzo złożone i na ich kształtowanie wpływa zwykle wiele czynników, zaś uwzględnienie ich wszystkich jest niemożliwe. Dlatego świadomie abstrahując od działania wszystkich czynników określa się optymalny zbiór parametrów diagnostycznych ze względu na niektóre kryteria (zbiór

F_1), pozostałe traktując jako czynniki wpływające na stabilność tego zbioru. Według autora najważniejsze to:

1. **Minimalna liczba elementów szeregu czasowego niezbędna do uruchomienia predykcji.**
2. **Zmiana niezawodności zespołów pojazdu mechanicznego w czasie jego eksploatacji.** Wynika ona, np. z wymiany lub regulacji zespołów pojazdu oraz zmiennych warunków eksploatacji pojazdu (np. warunków drogowych, warunków klimatycznych, jakości obsługi), powodujących skokowe zmiany wartości parametrów diagnostycznych.
3. **Maksymalna wartość „kroku czasowego” szeregu czasowego.**
4. **Liczebność optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych.**

Niezależnie od określenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych, na podstawie którego konstruuje się prognozę, ważną rolę odgrywa także wybór metody prognozowania. Podobnie jak w poprzednim przypadku, optymalną metodę prognozowania wybiera się na podstawie niektórych kryteriów (zbiór F_2), pozostałe traktując jako czynniki na nią wpływające. Autor uważa, że najważniejszymi wśród nich są :

1. **„Horyzont czasowy prognozy”.**
2. **Minimalna liczba elementów szeregu czasowego niezbędna do uruchomienia predykcji.**
3. **Liczba elementów szeregu czasowego przed czasem t_b przyjmowana do wyznaczania prognozy PST.**
4. **Zmiana niezawodności zespołów pojazdu mechanicznego w czasie eksploatacji powodująca skokowe zmiany wartości parametrów diagnostycznych.**

Reasumując, użytkownik przystępujący do określenia prognozy natrafia na problemy, które sprowadzają się do następujących pytań :

1. **Czy optymalny zbiór parametrów diagnostycznych jest wrażliwy, tzn., czy wykazuje istotne zmiany, a jeśli tak to jaki jest charakter tych zmian w zależności od przedstawionych czynników?**
2. **W jaki sposób na stabilność optymalnej prognozy (PST^o) wpływają czynniki charakterystyczne dla eksploatacji pojazdu, mianowicie: wartość „horyzontu czasowego prognozy” (uzależniona od potrzeb użytkownika), zmienne warunki eksploatacji i zmiana niezawodności zespołów pojazdu mechanicznego?**

Trafne rozwiązanie wskazanych problemów jest niezbędne do efektywnego prognozowania stanu technicznego układów i zespołów pojazdu, a tym samym wymusza konieczność badania wrażliwości optymalnych prognoz na powyższe czynniki.

Jeżeli badanie wykaże, że uzyskana PST^o jest wrażliwa, wówczas można ją wykorzystać w obsłudze układów i zespołów pojazdu. W przeciwnym wypadku należy, w myśl schematu (rys.2.2), podjąć decyzję o modyfikacji założeń i ograniczeń, np. poprzez świadome nieuwzględnienie czynników wywołujących brak wrażliwości prognozy i tym samym zmniejszenie uniwersalności otrzymanego rozwiązania.

Przedstawiona powyżej konieczność badania wrażliwości rozwiązań wymaga metod, które pozwolą określić wrażliwość optymalnej prognozy na przedstawione czynniki. W tym celu, po przeprowadzeniu modyfikacji niektórych metod badania wrażliwości modeli ekonometrycznych [111], opracowano następujące metody badania wrażliwości optymalnej prognozy (PST^o). Są to:

Metoda badania wpływu zmiany niezawodności zespołów pojazdu

Zmiana niezawodności zespołów pojazdu, wynikająca, np. z ich regulacji lub wymiany, jest pierwszym czynnikiem, który należy uwzględnić przy:

1. Wyznaczeniu optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych. Podstawą wnioskowania na temat wrażliwości w przypadku optymalnego rozwiązania x_1° jest określenie stałości tego rozwiązania w funkcji przebiegu (dla kolejnych elementów szeregu czasowego). Stałość rozwiązań świadczy o braku wrażliwości, zaś zmienność rozwiązań w funkcji przebiegu wymusza konieczność uwzględnienia wpływu zmiennej niezawodności zespołów pojazdu na optymalny zbiór parametrów diagnostycznych w każdym n -tym elemencie szeregu czasowego. Oblicza się wówczas wartości współczynnika korelacji liniowej (2.46) i przyjmuje to rozwiązanie, dla którego spełniona jest nierówność:

$$r_j \geq r_j^{\min} \quad (3.49)$$

gdzie r_j^{\min} - przyjęta przez użytkownika minimalna wartość r_j , np. $r_j^{\min} = 0.5$.

2. Przy wyborze optymalnej metody prognozowania podstawą wnioskowania na temat wrażliwości optymalnego rozwiązania x_2° jest określenie zmienności tego rozwiązania w funkcji przebiegu pojazdu. Stałość rozwiązań świadczy o braku wrażliwości, zaś niestałość rozwiązań w funkcji przebiegu wymusza konieczność uwzględnienia wpływu zmiennej niezawodności zespołów pojazdu na prognozę w każdym elemencie szeregu czasowego. Realizuje się to poprzez jej wyznaczenie, według kryterium minimalnego błędu prognozy, dla każdego elementu szeregu czasowego po czasie t_b .

Metoda badania wpływu wartości „horyzontu czasowego prognozy”

Podstawą wnioskowania na temat wrażliwości optymalnej prognozy (PST^o) jest określenie stałości wartości składników PST^o dla różnych wartości „horyzontu czasowego prognozy” τ .

Stałość wartości tych wielkości świadczy o braku wrażliwości, zaś niestałość wymusza konieczność określenia wartości „horyzontu czasowego prognozy” τ przez użytkownika poprzez przyjęcie przez niego maksymalnej wartości dopuszczalnej błędu prognozy e_p według wyrażenia:

$$\tau^{\circ} = \tau_{n^*} \quad (3.50)$$

$$n^* = 1, \dots, N \quad \wedge \quad e_p(\tau_{n^*}) < e_p^{\max}$$

gdzie e_p^{\max} - maksymalna dopuszczalna wartość błędu prognozy akceptowana przez użytkownika, np. na podstawie wniosków z rozdziału 2, $e_p^{\max} < 10\%$.

Metoda badania wpływu liczby elementów szeregu czasowego na prognozę PST

Rozpatruje się dwa problemy:

1. Określenie minimalnej liczby elementów szeregu czasowego

Minimalna liczba elementów szeregu czasowego niezbędna do uruchomienia predykcji jest następnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę przy konstruowaniu optymalnej prognozy. Jako podstawę wnioskowania autor proponuje przyjąć minimalną liczbę elementów szeregu czasowego, niezbędną dla wyznaczenia PST według określonej metody prognozowania, n_p .

Minimalną liczbę elementów szeregu czasowego n_{\min} obliczą się wówczas z wyrażenia:

$$n_{\min} \geq n_p + 3 \quad (3.52)$$

Dodatkowo sprawdza się ostatni n -ty element minimalnej liczby elementów szeregu czasowego poprzez określenie, czy spełniona jest nierówność (3.49). W przypadku negatywnego wyniku sprawdzenia, dobór elementów kontynuuje się do chwili otrzymania pozytywnego wyniku.

2. Określenie liczby elementów szeregu czasowego przed czasem t_b przyjmowanych do obliczenia prognozy

Jako podstawę do wnioskowania o liczbie elementów przed czasem t_b przyjmowaną do wyznaczania prognozy proponuje się przyjąć minimalną liczbę elementów szeregu czasowego n_{\min} (3.52) według wyrażenia:

$$n_{\min}(t_b) \geq n_p \quad (3.53)$$

Dodatkowo sprawdza się ostatni n -ty element niezbędnej liczby elementów szeregu czasowego $n_{\min}(t_b)$ poprzez obliczenie, czy spełniona jest nierówność:

$$e_p(n_{\min}(t_b)) < e_p^{\max} \quad (3.54)$$

gdzie e_p^{\max} - maksymalna dopuszczalna wartość błędu prognozy akceptowana przez użytkownika, np. $e_p^{\max} < 10\%$.

W przypadku negatywnego wyniku sprawdzenia, dobór elementów kontynuuje się do chwili otrzymania jego pozytywnego wyniku.

Metoda badania wpływu liczebności optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych na PST^o

W wyniku optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych otrzymuje się rozwiązanie x_1^o . W zależności od wyniku rozwiązania może być to zbiór jednoelementowy Y^o (rozwiązanie dominujące) lub zbiór wieloelementowy Y^o (rozwiązanie kompromisowe). Dla potrzeb wyznaczenia prognozy PST^o proponuje się obliczenie wag ważności parametrów diagnostycznych w_j według wyrażenia:

$$w_j = 1 - \frac{r_{i,j}}{\sum_{j=1}^J r_{i,j}} \quad (3.55)$$

gdzie $r_{i,j}$ - odległość od punktu idealnego (3.30) i -tego rozwiązania dla j -tego parametru diagnostycznego.

W przypadku zbioru jednoelementowego Y^o wartość $w_j=1$, w przypadku zbioru wieloelementowego Y^o wartość $w_j \in (0;1)$.

W celu wyznaczenia PST^o proponuje się skorzystać z wyrażenia:

$$PST^o = \frac{\sum_{j=1}^J PST_j^o}{\sum_{j=1}^J w_j} \quad (3.56)$$

gdzie $PST_j^0 = \langle t_{b1,j}^0, e_{p,j}^0, r_{\sigma,j}^0 \rangle$.

Podstawą wnioskowania na temat wrażliwości PST^0 jest określenie stałości wartości błędu prognozy e_p (2.55) dla różnej liczebności optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych Y^0 .

Stażość wartości e_p świadczy o braku wrażliwości, niestałość zaś wymusza konieczność zdeklarowania poziomu akceptacji zbioru Y^0 przez użytkownika w wyniku przyjęcia maksymalnej dopuszczalnej wartości błędu prognozy e_p według wyrażenia:

$$e_p(Y^0) < e_p^{\max} \quad (3.57)$$

W przypadku negatywnego wyniku sprawdzenia, dobór parametrów diagnostycznych realizuje się według innych kryteriów, np. według indywidualnych preferencji użytkownika.

3.4. Podsumowanie i wnioski

Reasumując rozpatrzone zagadnienia dotyczące wielokryterialnej optymalizacji wyznaczania prognozy (PST^0) można stwierdzić, że:

1. W celu rozwiązania zadania optymalizacyjnego wyznaczania prognozy (PST^0) wykorzystuje się metodę rozwiązań kompromisowych z normami (3.30) i (3.47).
2. Ze względu na potrzebę algorytmizacji wyznaczania PST^0 opracowano algorytmy odpowiednich procedur (w tym też algorytm procedury rozwiązania zadania optymalizacyjnego) wraz z propozycją ich implementacji.
3. Zaproponowano metody badania wrażliwości PST^0 na niektóre czynniki wynikające z warunków eksploatacji pojazdu :
 - a) metodę badania wpływu zmiany niezawodności zespołów pojazdu,
 - b) metodę badania wpływu wartości „horyzontu czasowego prognozy”,
 - c) metodę badania wpływu liczby elementów szeregu czasowego na PST^0 ,
 - d) metodę badania wpływu liczebności zbioru parametrów diagnostycznych na PST^0 .

Aplikacje powyższych metod i algorytmów zostaną przedstawione w badaniach weryfikacyjnych metody wyznaczania PST^0 dla pojazdów mechanicznych.

ROZDZIAŁ 4

EGZEMPLIFIKACJA METODY WYZNACZANIA OPTYMALNEJ PROGNOZY STANU TECHNICZNEGO POJAZDÓW MECHANICZNYCH

4.1. Opis obiektu badań

Program badań weryfikacyjnych, na podstawie których określi się przydatność opracowanej metody wyznaczania optymalnej prognozy (PST^o) dla pojazdów mechanicznych, opracowano na podstawie sformułowanych wymagań uwzględniających specyfikę eksploatacji pojazdu mechanicznego (rozdział 1), przyjętych założeń (1.2, 1.3) i wniosków z analizy wrażliwości prognozy (rozdział 3).

Badania obejmują:

1. Określenie zależności PST^o od:
 - a) wartości „horyzontu czasowego prognozy”,
 - b) wartości przebiegu pojazdu,
 - c) regulacji i wymiany zespołów pojazdu,
 - d) liczby elementów szeregu czasowego użytych do budowy prognozy przed czasem t_b ,
 - e) stopnia dekompozycji pojazdu.
2. Określenie minimalnej liczby elementów szeregu czasowego do wyznaczenia PST^o.
3. Określenie zależności pomiędzy cechami stanu i odpowiadającymi im parametrami diagnostycznymi.

Tak sformułowany przedmiot badań pozwala na określenie, czy opracowana metoda i otrzymywane dzięki niej optymalne prognozy (PST^o), w myśl zaleceń punktu 3.3, mogą być użyte w strategii obsługiwanego pojazdów mechanicznych według stanu technicznego. Podstawowymi warunkami takiej akceptacji, według autora, są:

- maksymalna dopuszczalna wartość błędu prognozy, $e_p \text{ dop} \leq 10\%$,
- wrażliwość prognozy (PST^o), z jednoczesnym określeniem wartości „horyzontu czasowego prognozy według (3.50) oraz minimalnej liczby elementów szeregu czasowego według (3.52).

Tak określony przedmiot badań wymaga uwzględnienia jak największej liczby układów i zespołów pojazdów charakteryzujących się:

- a) największą wartością prawdopodobieństwa występowania uszkodzeń, są nimi: silnik spalinowy, układ napędowy, instalacja elektryczna pojazdu;
- b) wpływem na bezpieczeństwo jazdy, są nimi: układ hamulcowy, układ kierowniczy, układ jezdy pojazdu, instalacja elektryczna pojazdu;
- c) zróżnicowanym charakterem zużycia (wymienione powyżej układy spełniają ten postulat).

Z tego względu dla zweryfikowania opracowanej metody konstruowania optymalnej prognozy (PST^o) wykorzystano wyniki badań samochodów STAR 200, wyniki badań hamownianych silników UTD-20, wyniki badań samochodów STAR 29 oraz przeprowadzono badania silników UTD-20 w WZM Siemianowice. Różnorodność obiektów badań wynika z konieczności spełnienia sformułowanych powyżej zaleceń, mających na celu uwzględnienie specyfiki eksploatacji pojazdów mechanicznych przejawiającej się

w różnorodności konstrukcji (pojazdy kołowe i gąsienicowe, silniki o zapłonie samoczynnym i iskrowym) oraz różnych warunkach eksploatacji.

W przypadku samochodów STAR 200 badania prowadzone były w IEPM WAT [56] na próbce losowo wybranych 8 samochodów ciężarowych skrzyniowych. Zakres badań obejmował pomiary wartości parametrów diagnostycznych układów pojazdu (silnika S-359 i układu napędowego). Badania były realizowane z częstotliwością nakazaną przez producenta w instrukcji samochodu. Średni przebieg badanego samochodu wynosił 237757 km.

Wykorzystując wyniki badań [56] określono zbiory elementów szeregu czasowego (wartości parametrów diagnostycznych w funkcji przebiegu samochodu, w tym także wartości nominalne $\{y_n\}$ i wartości graniczne $\{y_g\}$)

– dla silnika S-359 samochodu STAR 200:

y_5 - średnie ciśnienie sprężania; $y_{n5} = 2,9$ MPa, $y_{g5} = 2,3$ MPa,

y_6 - średni ubytek powietrza przed ZZP; $y_{n6} = 3$ %, $y_{g6} = 23$ %,

y_7 - średni ubytek powietrza w ZZP; $y_{n7} = 3$ %, $y_{g7} = 23$ %;

– dla układu napędowego samochodu STAR 200:

y_8 - luz obwodowy skrzyni biegów; $y_{n8} = 1,5^\circ$, $y_{g8} = 4^\circ$,

y_9 - luz obwodowy przekładni głównej; $y_{n9} = 6,5^\circ$, $y_{g9} = 18^\circ$,

y_{10} - całkowity luz obwodowy układu napędowego; $y_{n10} = 8^\circ$, $y_{g10} = 22^\circ$.

Dla silnika S-359 i układu napędowego STAR 200 szereg czasowy zawiera 12 elementów ($0 \div 240000$ km) z „krokiem czasowym” $\Delta t = 24000$ km.

W celu bogatszego zilustrowania opracowanych w poprzednim rozdziale algorytmów wyznaczania PST^o oraz spełnienia wymagań sformułowanych w programie badań weryfikacyjnych dodatkowo przedstawiono wyniki badań weryfikacyjnych metody wyznaczania PST^o dla układów pojazdów:

1. Układy samochodu STAR 29.

Badane były zespoły układu hamulcowego i instalacji elektrycznej. Badaniom poddano próbkę 10 samochodów STAR 29 eksploatowanych w jednostkach wojskowych [42,51]. Zakres badań obejmował pomiary wartości parametrów diagnostycznych zespołów i układów samochodu. Samochody charakteryzowały się różnym przebiegiem w czasie rozpoczęcia badań, co umożliwiło zebranie wyników w zakresie przebiegu 10000 ÷ 100000 km.

Do określenia wartości parametrów diagnostycznych układów wykorzystano przyrządy i układy pomiarowe, których dokumentacja i instrukcje badań przedstawione są w pracach [42,51].

Wykorzystując wyniki badań określono zbiory elementów szeregu czasowego (wartości parametrów diagnostycznych w funkcji przebiegu samochodu, w tym także wartości nominalne $\{y_n\}$ i wartości graniczne $\{y_g\}$)

– dla układu hamulcowego samochodu STAR 29:

y_1 - rezerwowy skok pedału hamulca; $y_{n1} = 110$ mm, $y_{g1} = 60$ mm,

y_2 - siła hamowania; $y_{n2} = 11,8$ kN, $y_{g2} = 10,2$ kN;

– dla układu zapłonowego samochodu STAR 29:

y_3 - napięcie cewki zapłonowej; $y_{n3} = 20$ kV, $y_{g3} = 8$ kV,

y_4 - statyczny kąt wyprzedzenia zapłonu; $y_{n4} = 16,5^\circ$, $y_{g4} = 11,5^\circ$.

Dla układu hamulcowego i układu zapłonowego samochodu STAR 29 szereg czasowy zawiera 10 elementów (od 10000 km do 100000 km) z „krokiem czasowym” $\Delta t = 10000$ km.

2. Układy pojazdu BWP.

Wykorzystano wyniki badań hamownianych silników UTD-20 prowadzone w WOŚS Piła [31,43]. Zakres badań obejmował pomiar wartości parametrów diagnostycznych silników przekazanych do remontu średniego i silników zużytych awaryjnie.

Wykorzystując wyniki badań określono zbiory elementów szeregu czasowego (wartości parametrów diagnostycznych w funkcji przebiegu samochodu, w tym także wartości nominalne $\{y_n\}$ i wartości graniczne $\{y_g\}$)

– dla silnika UTD-20:

y_{11} - moc silnika; $y_{n11} = 221$ kW, $y_{g11} = 165$ kW,

y_{12} - średnie ciśnienie sprężania; $y_{n12} = 2,5$ MPa, $y_{g12} = 1,9$ MPa,

y_{13} - średnie ciśnienie wtrysku, $y_{n13} = 24,8$ MPa, $y_{g13} = 17,0$ MPa,

y_{14} - ciśnienie oleju silnikowego, $y_{n14} = 1,05$ MPa, $y_{g14} = 0,6$ MPa.

Analizowany szereg czasowy dla silnika UTD-20 zawiera 40 elementów (od 855 km do 8858 km). Przyjęto, że „krok czasowy” w analizowanym szeregu czasowym odpowiada odległości w czasie dwóch kolejnych pomiarów, przy czym w związku z nierównością tych odległości wprowadzono tzw. średni „krok czasowy” Δt_i obliczony według wzoru:

$$\Delta t_i = \frac{t_b - t_1}{K - 1} \quad (4.1)$$

gdzie:

t_b - przebieg, przy którym badany jest silnik,

t_1 - przebieg początku eksploatacji silnika,

K - ilość elementów szeregu czasowego.

Ponadto, zgodnie z programem badań, w celu weryfikacji zależności pomiędzy cechami stanu i odpowiadającymi im parametrami diagnostycznymi, przeprowadzono badania mikrometrażowe zespołów silnika UTD-20 pojazdu BWP. Poddano nim silniki eksploatowane w jednostkach wojskowych, kierowane do remontu średniego w WZM Siemianowice [32]. Silniki charakteryzowały się różnym przebiegiem w czasie rozpoczęcia badań, co umożliwiło zebranie wyników w zakresie przebiegu 4500 ÷ 9000 km. Do określenia wartości parametrów mikrometrażowych wykorzystano przyrządy i układy pomiarowe, których dokumentacja i instrukcje badań przedstawione są w opracowaniach [32,75].

Wykorzystując wyniki badań określono zbiory elementów szeregu czasowego (wartości parametrów mikrometrażowych w funkcji przebiegu pojazdów, w tym wartości nominalne $\{y_n\}$ i wartości graniczne $\{y_g\}$ parametrów)

– dla silnika UTD-20:

y_{21} - średnia średnica tulei cylindra ; $y_{n21} = 150,02$ mm,

$y_{g21} = 150,3$ mm,

y_{22} - średnia średnica czopów korbowych ; $y_{n22} = 84,93$ mm,

$y_{g22} = 83,00$ mm.

Analizowany szereg czasowy dla silnika UTD-20 zawiera 11 elementów (od 4500 km do 9000 km). Przyjęto, że „krok czasowy” w analizowanym szeregu czasowym odpowiada odległości w czasie dwóch kolejnych pomiarów, przy czym w związku z nierównością tych odległości wprowadzono tzw. średni „krok czasowy” Δt_i obliczony według wzoru (4.1).

4.2. Wyznaczenie optymalnej prognozy stanu technicznego dla układów i zespołów pojazdów mechanicznych

Budowę optymalnej prognozy (PST^o) zrealizowano dla dwóch poziomów dekompozycji pojazdu STAR 200: UKŁAD - ZESPÓŁ.

1. UKŁAD:

- a) przestrzeń nadłokowa silnika S-359 (U2), analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_5, y_6, y_7\}$,
- b) układ napędowy samochodu STAR 200 (U3), analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_8, y_9, y_{10}\}$.

2. ZESPÓŁ:

- a) zespoły układu napędowego;
 - skrzynia biegów (Z4); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_8\}$,
 - przekładnia główna (Z5); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_9\}$.

Ponadto

1. Dla pojazdu BWP wyróżniono:

- a) silnik spalinowy UTD-20 (OB1); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór parametrów $Y=\{y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{14}\}$,
- b) układ tłokowo - korbowy silnika UTD-20 (U1); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_{12}, y_{14}\}$,
- c) zespoły układu tłokowo - korbowego silnika UTD-20;
 - węzeł tłok - pierścienie - cylinder (T-P-C) silnika (Z2); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_{12}\}$,
 - para czop - panewka silnika (Z3); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_{14}\}$.

2. Dla samochodu STAR 29 wyróżniono:

- a) układ hamulcowy samochodu STAR A 29 (U4); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_1, y_2\}$,
- b) układ zapłonowy samochodu STAR A 29 (U5); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_3, y_4\}$,
- c) zespoły układu zapłonowego samochodu STAR 29;
 - cewka zapłonowa (Z6); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_3\}$,
 - regulator odśrodkowy kąta wyprzedzenia zapłonu (Z7); analizowanym zbiorem parametrów diagnostycznych jest zbiór $Y=\{y_4\}$.

W celu wyznaczenia współrzędnych punktów idealnych c^{**} i d^{**} rozwiązano zadania optymalizacyjne (3.14, 3.31). Wykorzystując w tym celu przeprowadzoną w punkcie 3.2 algorytmizację procedur metody budowy optymalnej prognozy, opracowano programy komputerowe w środowisku WINDOWS / EXCEL:

- # PD (Parametry Diagnostyczne),
 - # MP (Metody Prognozowania),
 - # WOM (Wybór Optymalnych Metod),
- będące implementacją opracowanych algorytmów.

Programy te umożliwiły:

1. Program # PD - wyznaczenie zbioru parametrów diagnostycznych według różnych metod. Wyniki działania programu dla elementów szeregów czasowych (przebieg $t_1 \div t_b$), dla poziomu UKŁAD samochodu STAR 200 oraz dla pojazdu BWP i samochodu STAR 29 zawarte są w tablicy 4.1.

Tablica 4.1. Zestawienie wyników wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych

a) OB1 - Silnik UTD-20

| $Y \setminus X_1$ | $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{1,4}$ | r_i | w_j | w_j^* |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|---------|
| y_{11} | y^* | y^* | | y^* | 0,7498 | 0,3439 | 0,35 |
| y_{12} | | | | | | | |
| y_{13} | | | y^* | | 0,2600 | 0,6561 | 0,65 |
| y_{14} | | | | | | | |

b) U1 - Układ tłokowo-korbowy silnika UTD-20

| $Y \setminus X_1$ | $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{1,4}$ | r_i | w_j | w_j^* |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|---------|
| y_{12} | y^* | y^* | | y^* | 0,3707 | 0,8920 | 0,9 |
| y_{14} | | | y^* | | 0,0737 | 0,1080 | 0,1 |

c) U2 - Przestrzeń nadtłokowa silnika S-359

| $Y \setminus X_1$ | $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{1,4}$ | r_i | w_j | w_j^* |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|-------|---------|
| y_5 | y^* | | | | 0,8730 | 0 | 0,1 |
| y_6 | | y^* | | y^* | 0,0960 | 0 | 0,4 |
| y_7 | | | y^* | | 0 | 1 | 0,5 |

d) U3 - Układ napędowy samochodu STAR 200

| $Y \setminus X_1$ | $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{1,4}$ | r_i | w_j | w_j^* |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|---------|
| y_8 | | | | | | | |
| y_9 | | | y^* | | 0 | 1 | 0,6 |
| y_{10} | y^* | y^* | | y^* | 0,11 | 0 | 0,4 |

e) U4 - Układ hamulcowy samochodu STAR A-29

| $Y \setminus X_1$ | $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{1,4}$ | r_i | w_j | w_j^* |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|-------|---------|
| y_1 | | y^* | y^* | y^* | 0 | 1 | 0,6 |
| y_2 | y^* | | | | 0,7239 | 0 | 0,4 |

f) U5 - Układ zapłonowy samochodu STAR A-29

| $Y \setminus X_1$ | $x_{1,1}$ | $x_{1,2}$ | $x_{1,3}$ | $x_{1,4}$ | r_i | w_j | w_j^* |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|-------|---------|
| y_3 | | y^* | y^* | y^* | 0 | 1 | 0,7 |
| y_4 | y^* | | | | 0,5578 | 0 | 0,3 |

Zestawienie to zawiera także wyniki użycia programu # PD do rozwiązania zadania (3.14), tzn. wyznaczenia y^* dla metod X_1 , przy czym ze względu na brak danych (macierz $[M(i,j)]_{k \times m}$) dla rozwiązania $x_{1,1}$ wybrano parametr y^* na podstawie przeprowadzonej ankiety wśród diagnostów pojazdów mechanicznych).

2. Program # MP - wyznaczenie zbioru prognoz (t_{b1} - prognozowany termin obsługiwanego, e_p - błąd prognozy, r_σ - promień przedziału granicy błędu prognozy), według różnych metod ze zbioru X_2 wraz z wartościami kryteriów cząstkowych funkcji kryterialnej F_2 .

Wyniki działania programu dla elementów szeregów czasowych przy przyjęciu wartości „horyzontu czasowego prognozy” τ równej wartości „kroku czasowego” Δt , dla dwóch poziomów dekompozycji samochodu STAR 200, dla pojazdu BWP i samochodu STAR 29 oraz dla dwóch wartości współczynnika $1 - \gamma = (0,99; 0,95)$ i odpowiadających im dwóch wartości promienia przedziału błędu prognozy ($r_{\sigma 1}$ i $r_{\sigma 2}$) i dwóch wartości terminu diagnozowania ($t_{b1,1}$ - próg alertowy, opcja żółta; $t_{b1,2}$ - próg alarmowy, opcja czerwona) zawarto w tablicy 4.2.

Tablica 4.2. Zestawienie wyników wyznaczania PST^o

a) Samochód STAR 200

| Obiekt | γ^o | w_j | $x_2^o(\alpha)$ | e_p [%] | $r_{\sigma 1}$ [%] | $t_{b1,1}$ [km] | $r_{\sigma 2}$ [%] | $t_{b1,2}$ [km] |
|--------|--------------------------------|---------------|-----------------|--------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| U2 | $\gamma_5, \gamma_6, \gamma_7$ | 0,1; 0,4; 0,5 | $x_{2,3}(0,6)$ | 8,8 | 3,5 | 198150 | 2,4 | 198660 |
| U3 | γ_9, γ_{10} | 0,6; 0,4 | $x_{2,3}(0,8)$ | 11 | 1,0 | 232340 | 1,8 | 234720 |
| Z4 | γ_8 | 1 | $x_{2,1}$ | 2,4 | 1,5 | 350342 | 1,7 | 362023 |
| Z5 | γ_9 | 1 | $x_{2,1}$ | 4,0 | 2,1 | 190402 | 1,6 | 196144 |

b) Pojazd BWP

| Obiekt | γ^o | w_j | $x_2^o(\alpha)$ | e_p [%] | $r_{\sigma 1}$ [%] | $t_{b1,1}$ [km] | $r_{\sigma 2}$ [%] | $t_{b1,2}$ [km] |
|--------|----------------------------|------------|-----------------|--------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| OB1 | γ_{11}, γ_{13} | 0,35; 0,65 | $x_{2,3}(0,65)$ | 11 | 12,2 | 10650 | 8,1 | 11491 |
| U1 | γ_{12}, γ_{14} | 0,9; 0,1 | $x_{2,1}$ | 18 | 10 | 10345 | 8,2 | 12255 |
| Z1 | γ_{13} | 1 | $x_{2,3}(0,65)$ | 10,9 | 6,3 | 13357 | 4,7 | 13651 |
| Z2 | γ_{12} | 1 | $x_{2,3}(0,45)$ | 15,2 | 12 | 12485 | 9,2 | 13047 |
| Z3 | γ_{14} | 1 | $x_{2,3}(0,35)$ | 13,3 | 9 | 18231 | 7,4 | 18540 |

c) Samochód STAR 29

| Obiekt | γ^o | w_j | $x_2^o(\alpha)$ | e_p [%] | $r_{\sigma 1}$ [%] | $t_{b1,1}$ [km] | $r_{\sigma 2}$ [%] | $t_{b1,2}$ [km] |
|--------|----------------------|----------|-----------------|--------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| U4 | γ_1, γ_2 | 0,6; 0,4 | $x_{2,1}$ | 1,4 | 2,3 | 105000 | 1,4 | 112000 |
| U5 | γ_3, γ_4 | 0,7; 0,3 | $x_{2,1}$ | 1,2 | 1,7 | 162183 | 1,1 | 164392 |
| Z6 | γ_3 | 1 | $x_{2,1}$ | 1,5 | 1,3 | 168527 | 1,8 | 170659 |
| Z7 | γ_4 | 1 | $x_{2,1}$ | 2,8 | 6,8 | 138414 | 4,6 | 143132 |

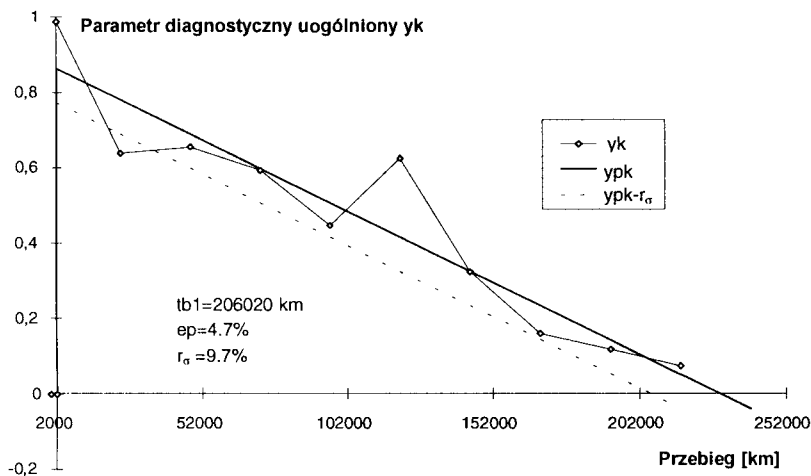
W celu wyznaczenia, dla rozwiązań $x_{2,3}$ i $x_{2,4}$, optymalnych wartości współczynnika α przeprowadzono badania [10] (wykorzystując przedstawioną w pracy metodę rozwiązania zadania optymalizacyjnego z funkcją kryterialną F_2). Optymalne wartości współczynnika α dla rozwiązań $x_{2,3}$ i $x_{2,4}$, w przypadku gdy $x_2^o = x_{2,3}$ lub $x_2^o = x_{2,4}$, przedstawiono w tablicy 4.2.

3. Program # WOM - wyznaczenie rozwiązań zadań polioptymalizacji (3.14, 3.31) metodą rozwiązań kompromisowych $C_K^{\Phi 1}$ i $D_K^{\Phi 2}$ według algorytmu (rys.3.6). W przypadku optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych obliczono także wartości funkcji wagi w_j , przy czym możliwe jest korygowanie wartości w_j przez użytkownika w postaci wartości skorygowanej w_j^* . Wartości wyników obliczeń dla rozwiązania $C_K^{\Phi 1}$ (wyznaczenie x_1^o i $\{w_j\}$) zawarto w tablicy 4.1, zaś wartości wyników obliczeń dla rozwiązania $D_K^{\Phi 2}$ (wyznaczenie x_2^o) przedstawiono w tablicy 4.2.

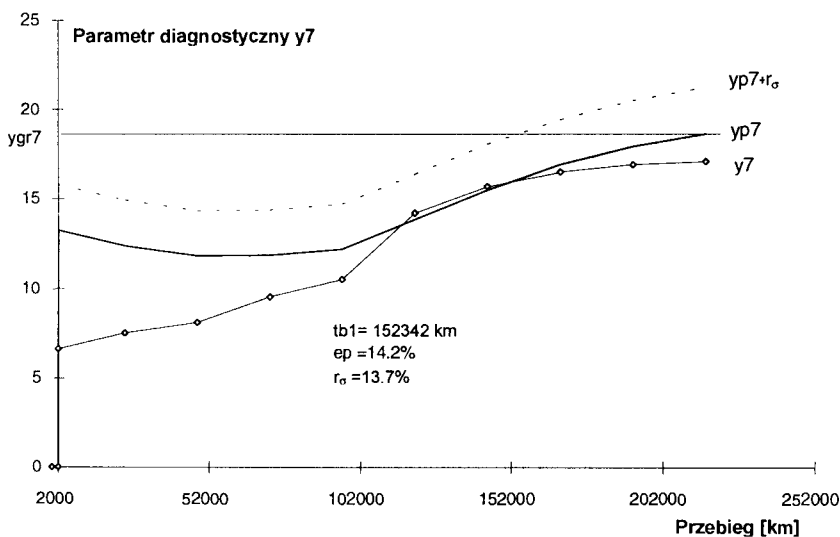
Przykładową interpretację graficzną wyznaczania terminu t_{b1} dla układu U2 i zespołu Z5 pokazują rysunki 4.1, 4.2.

Na podstawie analizy wyników przedstawionych w tabelicy 4.1 i 4.2 oraz na rysunkach 4.1, 4.2 stwierdzono, że:

1. W przypadku OB1, U1, U2, U3, U4, U5 otrzymuje się optymalny wieloelementowy zbiór parametrów diagnostycznych.
2. Optymalnymi metodami prognozowania dla analizowanych obiektów jest rozwiązanie $x_{2,1}$ oraz rozwiązanie $x_{2,3}$ (z różnymi wartościami współczynnika wyrównywania wykładniczego α).



Rys. 4.1. Interpretacja graficzna wyznaczania terminu t_{b1} dla U2 (przebieg nadłokowa silnika S-359) według $x_{2,1}$



Rys. 4.2. Interpretacja graficzna wyznaczania terminu t_{b1} dla Z5 (przebieg główna samochodu STAR 200) według $x_{2,3}$

3. Rozwiązania $x_{2,3}$ z $\alpha < 0,5$ świadczą o nieregularnej zmianie trendu w czasie i konieczności przywiązania większej wagi do ocen trendu w okresach poprzedzających termin badania pojazdu (t_b). Rozwiązania z $\alpha \in (0,5; 0,95)$ świadczą o regularnej zmianie trendu w czasie i konieczności przywiązania większej wagi do najnowszej oceny trendu w okresach poprzedzających termin badania pojazdu (t_b).
4. Wartości błędów prognozy dla analizowanych obiektów zawierają się w przedziale od 5 do 18%.
W przypadku obiektów grupy silnika UTD-20 i samochodu STAR 200 wartości błędów prognozy są większe. Wynika to z:
 - a) dość dużych wahań wartości parametrów diagnostycznych $y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{14}$ wynikających z przeprowadzonych wymian i regulacji zespołów silnika w w okresie czasu (t_1, t_b) oraz zmiennej wartości „kroku czasowego” Δt ;
 - b) większej wartości „horyzontu czasowego prognozy” ($\tau = 24000$ km) oraz z małej liczby elementów szeregu czasowego użytych do obliczeń w przypadku układów i zespołów samochodu STAR 200.
5. Wartości składników prognozy $PST = \langle t_{b1}, e_p, r_\sigma \rangle$ zależne są od poziomu dekompozycji pojazdu (wartości e_p, r_σ są większe dla wieloelementowych zbiorów parametrów diagnostycznych).
6. W przypadku, gdy $x_2^0 = x_{2,3}$ wartości e_p, r_σ są o kilkadziesiąt procent większe dla kilku pierwszych elementów szeregu czasowego (szczególnie dla silnika UTD-20). Z tego względu minimalna liczba elementów szeregu czasowego niezbędna do obliczeń, obok spełnienia postulatu (3.49), powinna uwzględniać też postulat maksymalnego błędu prognozy (3.54).
7. Wymiana silnika w trzech badanych samochodach STAR 200 przy przebiegu 96000 ÷ 120000 km [56] powoduje skokową zmianę wartości parametrów diagnostycznych $\{y_5, y_6, y_7\}$ w U2 (rys. 4.1), co powoduje też zmianę wartości promienia r_σ .
8. W zależności od wartości poziomu ufności $1 - \gamma$ otrzymuje się różne wartości promienia r_σ i odpowiadające im terminy ($t_{b1,1}$ - próg alertowy, $t_{b1,2}$ - próg alarmowy). Znaczne różnice wartości tych wielkości (dochodzące do kilkunastu tysięcy km) mogą pozwolić użytkownikowi na przyjęcie odpowiadających mu opcji alternatywnych, np. w stosunku do zalecenia diagnozowania przy progu alarmowym, diagnozowania układu lub zespołu pojazdu przy progu alertowym.

4.3. Badanie zależności prognozy od „horyzontu czasowego prognozy”

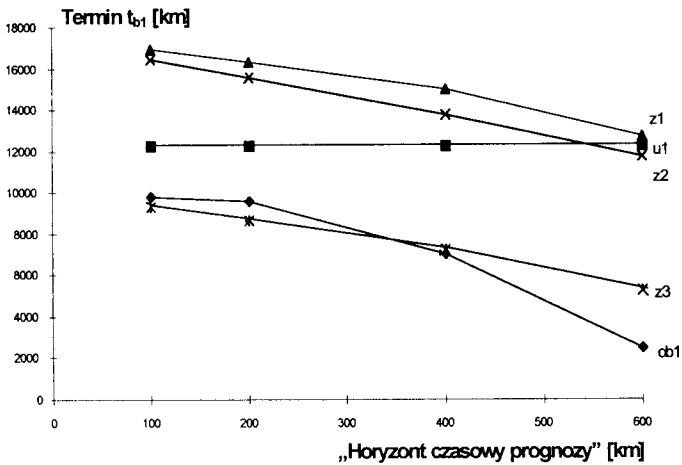
W celu określenia zależności optymalnej prognozy PST^0 od wartości „horyzontu czasowego prognozy” τ przyjęto do badań następujące wartości τ :

1. Dla układu hamulcowego i układu zapłonowego samochodu STAR 29; $\tau_1 = 5000$ km, $\tau_2 = 10000$ km, $\tau_3 = 15000$ km, $\tau_4 = 30000$ km,
2. Dla silnika S-359 i układu napędowego samochodu STAR 200; $\tau_1 = 12000$ km, $\tau_2 = 24000$ km, $\tau_3 = 36000$ km, $\tau_4 = 72000$ km,
3. Dla silnika UTD-20; $\tau_1 = 100$ km, $\tau_2 = 200$ km, $\tau_3 = 400$ km, $\tau_4 = 600$ km.

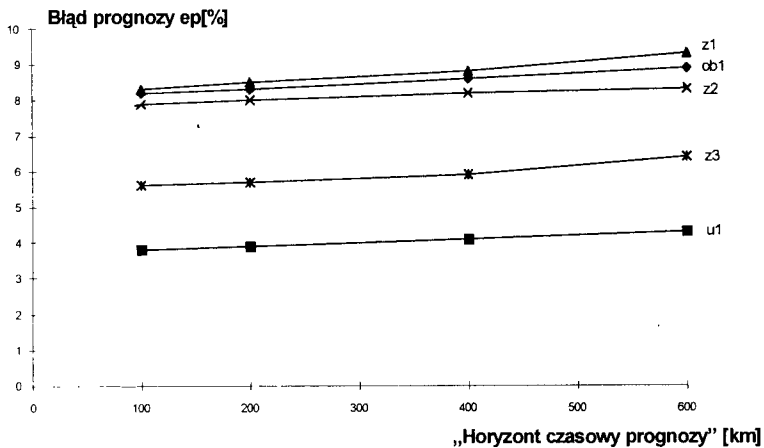
Przyjęte wartości stanowią odpowiednio 50, 100, 150 i 300% wartości średniego „kroku czasowego” w rozpatrywanym przedziale przebiegu $\langle t_1, t_b \rangle$.

Ponadto przyjęto poziom ufności $1 - \gamma = 0,95$ i odpowiednio: wartość promienia $r_{\sigma} = r_{\sigma 2}$ i termin obsługiwaną $t_{b1} = t_{b1,2}$ (próg alarmowy - opcja czerwona).

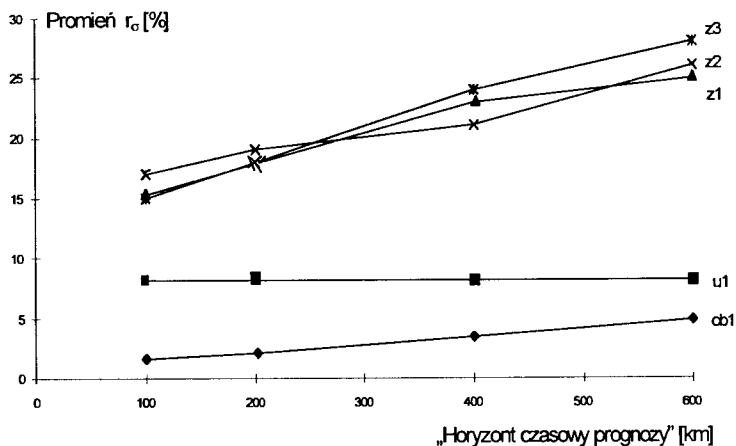
Interpretację graficzną zmiany wartości składników PST^o w zależności od różnych wartości „horyzontu czasowego prognozy” dla silnika UTD-20 przedstawiono na rysunkach 4.3, 4.4, 4.5.



Rys. 4.3. Zmiana wartości terminu t_{b1} w zależności od horyzontu prognozy dla silnika UTD-20



Rys. 4.4. Zmiana wartości błędu prognozy w zależności od „horyzontu czasowego prognozy” dla silnika UTD-20



Rys. 4.5. Zmiana wartości promienia r_σ w zależności od „horyzontu czasowego prognozy” dla silnika UTD-20

Analizując wyniki obliczeń oraz odpowiadające im interpretacje graficzne zmiany składników PST° w zależności od „horyzontu czasowego prognozy” (rys. 4.3, 4.4, 4.5) stwierdzono, że:

1. Zwiększenie wartości „horyzontu czasowego prognozy” τ powoduje wzrost wartości promienia r_σ i zmianę wartości terminu t_{b1} oraz nieznaczny wzrost błędu prognozy e_p .
2. Zmiana wartości „horyzontu czasowego prognozy” τ w przypadku metody $x_{2,1}$ nie powoduje zmiany składników prognozy PST° , z wyjątkiem nieznacznej zmiany błędu prognozy e_p .
3. Największe zmiany składników PST° występują dla zespołów silnika UTD-20 (rys. 4.3, 4.5). Spowodowane to jest nierówną wartością „kroku czasowego” analizowanego szeregu czasowego; pozostałe obiekty badań (z równymi „krokami czasowymi” - samochody STAR) wykazują zmiany kilkuprocentowe.
4. Zwiększenie wartości „horyzontu czasowego prognozy” τ zwiększa wartość błędu prognozy e_p oraz wartość promienia r_σ , co wymusza konieczność odwołania się do warunku (3.50) i przyjęcie przez użytkownika akceptowanej przez niego wartości „horyzontu czasowego prognozy” τ° .

4.4. Badanie zależności prognozy od przebiegu pojazdu

W celu określenia zależności prognozy PST° od przebiegu pojazdu, przyjęto do badań:

- dla silnika UTD-20 osiemnaście przedziałów szeregu czasowego, odpowiednio: od 6 elementu szeregu czasowego (5100 km), co dwa elementy, do 40 elementu (8858 km);
- dla układu hamulcowego i układu zapłonowego samochodu STAR A 29 - sześć przedziałów szeregu czasowego, odpowiednio od 5 elementu szeregu czasowego (50000 km), co jeden element do 10 elementu (100000 km);
- dla silnika S-359 i układu napędowego samochodu STAR 200 - sześć przedziałów szeregu czasowego, odpowiednio: od 5 elementu szeregu czasowego (96000 km), co jeden element, do 10 elementu (216000 km).

Przykładowe wyniki obliczeń dla układu U2 zawiera tablica 4.3.

Tablica 4.3. Zestawienie wyników obliczeń zależności składników PST^o od przebiegu pojazdu dla układu U2

| Nr | Przebieg [km] | Y^o | w_j | $x_2^o(\alpha)$ | t_{b1} [km] | e_p [%] | r_σ [%] |
|----|---------------|-----------------|-------------|-----------------|---------------|-----------|----------------|
| 5 | 96000 | y_5, y_6, y_7 | 0,1;0,4;0,5 | $x_{2,1}$ | 161491 | 4,0 | 2,6 |
| 6 | 120000 | y_5, y_6, y_7 | 0,2;0,3;0,5 | $x_{2,1}$ | 281782 | 9,6 | 8,0 |
| 7 | 144000 | y_5, y_6 | 0,1;0,9 | $x_{2,1}$ | 200145 | 7,0 | 6,0 |
| 8 | 168000 | y_5, y_6 | 0,1;0,9 | $x_{2,1}$ | 185134 | 5,0 | 3,6 |
| 9 | 192000 | y_5, y_6 | 0,1;0,9 | $x_{2,1}$ | 221011 | 4,3 | 3,0 |
| 10 | 216000 | y_5, y_6, y_7 | 0,1;0,4;0,5 | $x_{2,3}(0,6)$ | 221540 | 8,8 | 2,4 |

Analizując wyniki obliczeń przedstawione w tablicy 4.3 stwierdzono, że:

- Dla poszczególnych elementów szeregu czasowego otrzymuje się wieloelementowe rozwiązanie optymalne x_1^o , co stwarza następujące możliwości dla użytkownika:
 - akceptację otrzymanego optymalnego rozwiązania,
 - korekcję rozwiązania w wyniku wprowadzenia przez użytkownika własnych wartości funkcji wagi w_j ,
 - określenie jednego optymalnego parametru, wymusza to konieczność jego wyboru przez użytkownika, np. poprzez badanie warunku (3.49) i przyjęcie rozwiązania (z akceptowaną wartością współczynnika korelacji liniowej).
- Dla poszczególnych elementów szeregu czasowego występuje zmiana wartości funkcji wagi i liczebności optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych.
- W analizowanych elementach szeregu czasowego występuje zmiana wartości składników prognozy PST.
- Największe zmiany wartości składników prognozy PST występują przy zbiorach wieloelementowych, przy czym największe zmiany wartości błędu prognozy występują dla silnika UTD-20 (zmiana błędu prognozy e_p o kilkanaście procent). Spowodowane to jest, podobnie jak przy badaniu wpływu „horyzontu czasowego prognozy”, nierówną wartością „kroku czasowego” analizowanego szeregu czasowego (pozostałe obiekty badań z równymi „krokami czasowymi” wykazują zmiany kilkuprocentowe).
- Zmiana wartości parametrów diagnostycznych dla U2 $\{y_5, y_6, y_7\}$, spowodowana wymianą silnika w trzech badanych samochodach przy przebiegu 96000 + 120000 km [8] preferuje rozwiązanie $x_{2,1}$. Następuje tylko nieznaczny wzrost wartości błędu prognozy e_p i promienia r_σ (tablica 4.3) oraz dość znaczny wzrost wartości terminu t_{b1} (odtworzenie zapasu przebiegu poprzez wymianę i regulację silników).

4.5. Określenie minimalnej liczby elementów szeregu czasowego do wyznaczenia prognozy

Rozpatruje się dwa zagadnienia:

- określenie minimalnej liczby elementów szeregu czasowego niezbędnych do wyznaczenia PST^o,
- badanie zależności prognozy PST^o od liczby analizowanych elementów szeregu czasowego przed czasem t_b .

W celu określenia minimalnej liczby elementów szeregu czasowego niezbędnych do wyznaczenia optymalnej prognozy przyjęto do obliczeń, zgodnie z wyrażeniem (3.52), wartość:

$$n_{\min} \geq 6 \quad (4.2)$$

gdzie $n_p = 3$ (niezbędna liczba elementów szeregu czasowego do obliczeń w metodach będących elementami zbioru X_2).

Dalsze badanie sprowadza się wówczas do sprawdzenia, czy spełniona jest nierówność (3.49) oraz sprawdzenia czy współczynnik korelacji liniowej R^2 jest istotnie różny od zera („+” jest istotnie różny, „-” nie jest istotnie różny) za pomocą testu istotności dla współczynnika korelacji liniowej.

Przykładowe wyniki obliczeń dla pojazdów STAR 200, STAR 29 i BWP zawiera tablica 4.4.

Tablica 4.4. Zestawienie wyników obliczeń współczynnika korelacji R^2 i testu istotności współczynnika korelacji liniowej

| Nr elementu szeregu czasowego | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 | Z6 | Z7 |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 6 | 0.42(-) | 0.35(-) | 0.54(-) | 0.86(+) | 0.95(+) | 0.94(+) | 0.92(+) |
| 8 | 0.57(-) | 0.32(-) | 0.68(+) | 0.95(+) | 0.95(+) | 0.95(+) | 0.95(+) |
| 10 | 0.65(+) | 0.42(-) | 0.74(+) | 0.95(+) | 0.95(+) | 0.95(+) | 0.95(+) |
| 12 | 0.42(-) | 0.25(-) | 0.69(+) | | | | |
| 14 | 0.58(+) | 0.18(-) | 0.72(+) | | | | |
| 16 | 0.48(-) | 0.03(-) | 0.65(+) | | | | |
| 18 | 0.56(+) | 0.03(-) | 0.68(+) | | | | |
| 20 | 0.62(+) | 0.02(-) | 0.57(+) | | | | |

Analizując wyniki obliczeń przedstawione w tablicy 4.4 stwierdzono, że:

1. Minimalnymi liczbami elementów szeregu czasowego n_p dla przedstawionych metod są:

$$\begin{aligned}
 - n_{\min}(x_{2,1}) &= 6 && \text{przy } n_p = 3 \\
 - n_{\min}(x_{2,2}) &= 7 && \text{przy } n_p = 4 \\
 - n_{\min}(x_{2,3}) &= 9 && \text{przy } n_p = 6 \\
 - n_{\min}(x_{2,4}) &= 10 && \text{przy } n_p = 7
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Wartości n_p dla poszczególnych rozwiązań przyjęto na podstawie analizy algorytmów obliczeniowych metod prognozowania.

2. Wyniki sprawdzeń warunku akceptacji przez użytkownika (3.49) wykazują, że w rozpatrywanych przypadkach wartość współczynnika korelacji liniowej dla elementu szeregu czasowego, określonego jako n_{\min} (z wyjątkiem silnika UTD-20), jest wyższa od przyjętej wartości minimalnej $r_f = 0.5$, zaś współczynnik korelacji liniowej jest istotnie różny od zera, stąd minimalna liczba punktów czasowych niezbędna do wyznaczenia prognozy, dla „horyzontu czasowego prognozy” $\tau = \Delta t$, na podstawie wyrażenia (3.52) wynosi odpowiednio jak określono powyżej (4.3).

3. W przypadku dużych wartości „kroków czasowych” (samochód STAR 200 (Z4, Z5) - $\Delta t=24000$ km i samochód STAR 29 (Z6, Z7) - $\Delta t=10000$ km) n_{\min} przyjmują wartości:
- n_{\min} (STAR 200) = 144000 km,
 - n_{\min} (STAR 29) = 70000 km.

Powoduje to konieczność zmniejszenia „kroku czasowego” Δt , np. do wartości (4000 + 6000) km w etapie wdrożenia metody wyznaczania prognozy, bowiem nie do przyjęcia przez użytkownika byłoby stosowanie prognozy PST dopiero po 144000 km przebiegu pojazdu.

4. W przypadku niespełnienia warunku (3.49) proponuje się kontynuowanie sprawdzenia warunku akceptacji aż do jego spełnienia lub wyłączenie parametru ze zbioru parametrów diagnostycznych Y° .

Minimalna liczba elementów szeregu czasowego przed czasem t_b , niezbędnych do wyznaczenia optymalnej prognozy, zgodnie z wyrażeniem (3.53), przyjmuje wartość:

$$n_{\min}(t_b) > n_{\min}$$

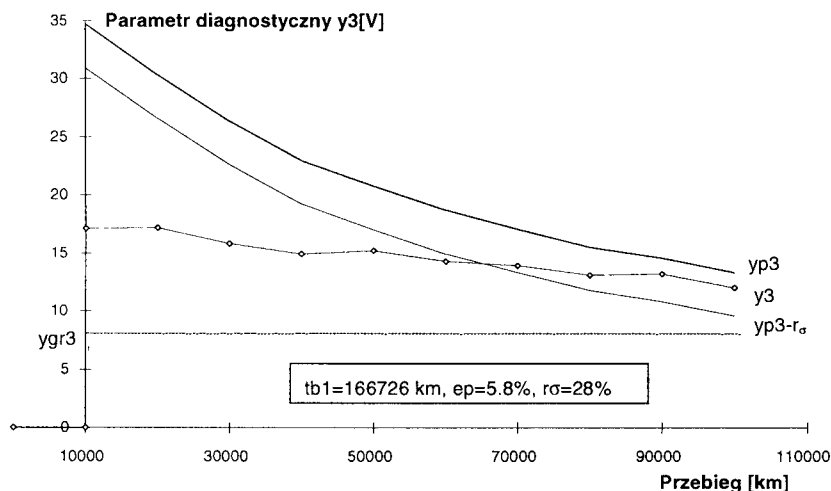
gdzie $n_{\min} = 6, 7, 9$ lub 10 (minimalna liczba elementów szeregu czasowego niezbędna do obliczeń w metodach będących elementami zbioru X_2).

Dalsze badanie sprowadza się wówczas do sprawdzenia, czy spełniona jest nierówność (3.54) przy czym przyjmuje się $e_p^{\max} < 10\%$.

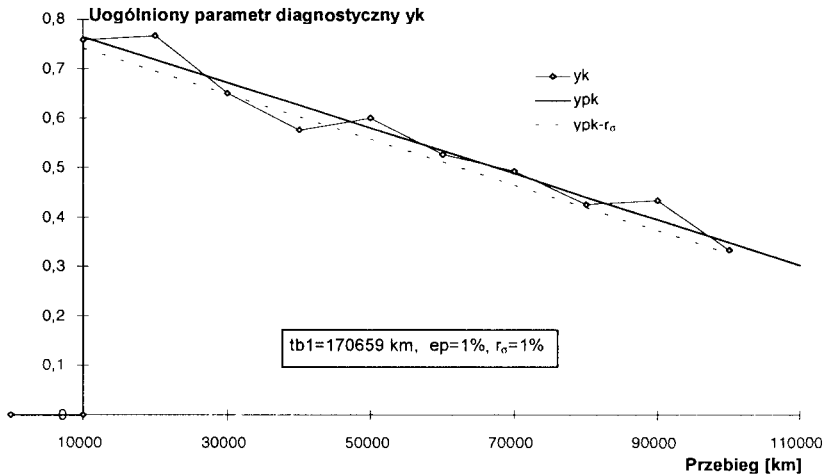
Interpretację graficzną zależności e_p od liczby analizowanych elementów szeregu czasowego przed czasem t_b dla metod $x_{2,1}$ i $x_{2,3}$ zawierają rys. 4.6, 4.7.

Analizując wyniki obliczeń zilustrowanych na rysunkach 4.6, 4.7 stwierdzono, że:

1. W przypadku gdy $x_2^{\circ} = x_{2,3}$ należy dysponować do obliczeń co najmniej 10 elementami szeregu czasowego, wówczas $n_{\min}(t_b) \geq 10$, $e_p < 10\%$ (rys. 4.6).
2. W przypadku gdy $x_2^{\circ} = x_{2,1}$ należy dysponować do obliczeń co najmniej 6 elementami szeregu czasowego (według ustaleń w 4.5), wówczas $n_{\min}(t_b) \geq 6$, $e_p < 10\%$ (rysunki 4.7).



Rys. 4.6. Zmiana wartości promienia e_p w zależności od liczby analizowanych elementów szeregu czasowego przed t_b dla Z6 (cewka zapłonowa samochodu STAR-29) według metody $x_{2,3}$



Rys. 4.7. Zmiana wartości promienia e_p w zależności od liczby analizowanych elementów szeregu czasowego przed t_b dla Z6 (cewka zapłonowa samochodu STAR29) według metody $x_{2,1}$

3. Dla kilku pierwszych elementów szeregu czasowego następuje dopasowywanie prognozowanego trendu do wartości parametru diagnostycznego. Średni promień przedziału błędu prognozy r_σ oraz błąd prognozy e_p dla metody $x_{2,1}$ są kilkakrotnie niższe niż dla metody $x_{2,3}$.

4.6. Badanie zależności między parametrami diagnostycznymi i cechami stanu pojazdu

W celu określenia zależności między cechami stanu i parametrami diagnostycznymi (sprawdzenia prawdziwości założenia wyrażonego wzorami (1.2, 1.3) przyjęto do obliczeń zbiór parametrów mikrometrażowych Y_m (cechy stanu) i parametrów diagnostycznych Y :

1. Dla węzła T-P-C (Tłok-Pierścień-Cylinder) silnika UTD-20:
 - a) zbiór parametrów diagnostycznych $\{y_{12}\}$,
 - b) zbiór parametrów mikrometrażowych $\{y_{21}\}$.
2. Dla węzła Cz-P (Czop-Panewka) silnika UTD-20:
 - a) zbiór parametrów diagnostycznych $\{y_{14}\}$,
 - b) zbiór parametrów mikrometrażowych $\{y_{22}\}$.

Badania prawdziwości zależności (1.2, 1.3) polegały na określeniu :

1. Czy parametry mikrometrażowe istotnie ulegają zmianie w funkcji przebiegu pojazdu?
2. Czy parametry diagnostyczne istotnie ulegają zmianie w funkcji przebiegu pojazdu?
3. Czy parametry diagnostyczne istotnie są zależne od parametrów mikrometrażowych i jaka jest to zależność funkcyjna?

W celu określenia zmienności parametrów mikrometrażowych i parametrów diagnostycznych w funkcji przebiegu dokonano:

- a) estymacji liniowej funkcji regresji parametrów mikrometrażowych i przebiegu,

- b) estymacji liniowej funkcji regresji parametrów diagnostycznych i przebiegu,
 c) badania czy współczynnik regresji liniowej jest istotnie różny od zera („+” jest istotnie różny, „-” nie jest istotnie różny) za pomocą testu istotności dla współczynnika regresji liniowej,
 d) wyznaczenia przedziału ufności dla prostej regresji określonej krzywymi ufności z błędem o wartości 5% i określenia czy jej wartości mieszczą się w tym przedziale („-” poza przedziałem, „+” w przedziale),
 e) wyznaczenia postaci zależności funkcyjnej (funkcji regresji) pomiędzy parametrami diagnostycznymi i parametrami mikrometrażowymi (funkcję wyznacza maksymalna wartość współczynnika korelacji $r_1(y, y_m)$).

Wyniki obliczeń dla powyższego algorytmu zawiera tablica 4.5.

Tablica 4.5. Zestawienie wyników obliczeń badania zależności między parametrami diagnostycznymi i cechami stanu pojazdu

a) Węzeł T-P-C silnika UTD-20

| Cechy populacji | Postać funkcji regresji | Test istotności | Przedział ufności | $r_f(y, T)$ | $r_1(y, y_m)$ |
|--------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|-------------|---------------|
| (y_{12}, T) | Liniowa | - | + | 0,1327 | |
| (y_{21}, T) | Liniowa | + | + | 0,8567 | |
| (y_{12}, y_{21}) | Liniowa | | + | | 0,2834 |

b) Węzeł Cz -P silnika UTD-20

| Cechy populacji | Postać funkcji regresji | Test istotności | Przedział ufności | $r_f(y, T)$ | $r_1(y, y_m)$ |
|--------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|-------------|---------------|
| (y_{14}, T) | Liniowa | - | + | 0,3351 | |
| (y_{22}, T) | Liniowa | + | + | 0,8813 | |
| (y_{14}, y_{22}) | Wielomian | | + | | 0,5602 |

Analizując wyniki obliczeń przedstawione w tablicy 4.5 stwierdzono, że:

- Zależności wartości parametrów mikrometrażowych $y_{21}=f(T)$, $y_{22}=f(T)$ charakteryzują się:
 - dużą wartością współczynnika korelacji $R^2 > 0,8$,
 - współczynniki regresji liniowej są istotnie różne od zera (odrzućcie hipotezy $H_0: a=0$),
 - proste regresji mieszczą się w przedziale ufności wartości błędu 5%.
- Zależności wartości parametrów diagnostycznych $y_{12}=f(T)$, $y_{14}=f(T)$ charakteryzują się:
 - małą wartością współczynnika korelacji $0,1 < R^2 \leq 0,33$,
 - współczynniki regresji liniowej nie są istotnie różne od zera (nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy $H_0: a=0$),
 - proste regresji nie mieszczą się w przedziale ufności wartości błędu 5%.
- Zależności wartości parametrów diagnostycznych i parametrów mikrometrażowych $y_{12}=f(y_{22})$, $y_{14}=f(y_{24})$ charakteryzują się:
 - różną postacią funkcji regresji (prosta, wielomian rzędu drugiego),
 - niezbyt dużą wartością współczynnika korelacji $0,2 < R^2 \leq 0,56$,

- c) funkcje regresji mieszczą się (z nielicznymi wyjątkami) w przedziale ufności wartości błędu 5%,
- d) współczynnik regresji liniowej (dla $y_{12} = f(y_{22})$) jest istotnie różny od zera (odrzućcie hipotezy $H_0: a=0$).

W konkluzji stwierdza się, że:

1. Parametry mikrometrażowe y_{21} , y_{22} są istotnie zależne od przebiegu pojazdu.
2. Parametry diagnostyczne y_{12} , y_{14} nie są istotnie zależne od przebiegu pojazdu.
3. Parametry diagnostyczne są zależne od wartości parametrów mikrometrażowych, przy czym siła zależności wyrażona wartością współczynnika korelacji R^2 nie jest zbyt duża.
4. Określone zależności funkcyjne $y_{12} = f(y_{22})$, $y_{14} = f(y_{24})$ ze względu na małą liczebność zbioru parametrów mikrometrażowych, jak i uzyskane wyniki obliczeń (R^2), należy traktować jako bardzo przybliżone.
5. W celu przeprowadzenia badania zależności między parametrami diagnostycznymi i cechami stanu należy dysponować szeregiem czasowym o liczebności co najmniej 20 elementów szeregu czasowego (możliwe wówczas będzie, np. szacowanie zależności funkcyjnej wielomianami wyższych rzędów).
6. Otrzymane wyniki badań zależności parametrów diagnostycznych i parametrów mikrometrażowych determinują konieczność dołączenia do funkcji kryterialnej F_1 funkcji kryterialnej cząstkowej w postaci obliczenia współczynnika korelacji liniowej R^2 i sprawdzenia, czy współczynnik regresji liniowej parametru diagnostycznego w funkcji przebiegu pojazdu jest istotnie różny od zera (realizacja pętli sprzężenia zwrotnego oceny otrzymanych wyników - rysunki 2.2).

4.7. Podsumowanie i wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań weryfikacyjnych metody wyznaczania optymalnej prognozy (PST^o) układów i zespołów pojazdów stwierdzono, że:

1. W przypadku wieloelementowych zbiorów parametrów diagnostycznych (dla układów pojazdów), w wyniku optymalizacji otrzymuje się wieloelementowe lub jednoelementowe zbiory parametrów diagnostycznych, przy czym zarówno liczba parametrów diagnostycznych, jak i wartości wag w_j zmieniają się w zależności od (tablica 4.1, 4.2):
 - a) przebiegu pojazdu,
 - b) regulacji i wymiany zespołów,
 - c) stopnia dekompozycji pojazdu (tablica 4.2a).
 Wymusza to konieczność wyboru optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych dla każdego elementu szeregu czasowego po czasie t_b .
2. Zmiana wartości "horyzontu czasowego prognozy" τ powoduje, w przypadku procedur X_2 , z wyjątkiem $x_{2,1}$, zmianę wartości składników optymalnej prognozy PST^o. Wzrost wartości τ powoduje:
 - a) wzrost wartości błędu prognozy e_p ,
 - b) wzrost wartości promienia prognozy r_σ ,
 - c) zmniejszenie wartości terminu następnego diagnozowania t_{b1} .

W przypadku przyjęcia $\tau > \Delta t$ należy sprawdzić czy spełniona jest nierówność $t_{b1} > t_b$.

W przypadku jej niespełnienia, należy zmniejszyć wartość τ . Na podstawie analizy

wyników (punkt 4.2), dla wszystkich założonych sytuacji (zmiana przebiegu pojazdu, regulacja i wymiana zespołów pojazdu, dekompozycja pojazdu) stwierdza się, że w myśl (3.50) występuje zmiana wartości maksymalnej wartości „horyzontu czasowego prognozy” τ_{\max} (tablica 4.3-4.5).

3. Zmiana przebiegu pojazdu powoduje zmianę składników optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych i zmianę składników optymalnej prognozy (PST^o), tzn.:
 - a) w zakresie działania procedur X_1 :
 - zmianę liczby i składu optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych,
 - zmianę wartości funkcji wagi w_j ;
 - b) w zakresie działania procedur X_2 :
 - zmianę optymalnej metody x_2^o wyznaczającą PST^o,
 - zmianę wartości składników PST^o.

Z tego względu dla każdego elementu szeregu czasowego po czasie t_b należy:

- dokonać wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych Y^o ,
 - dokonać wyboru optymalnej metody prognozowania i wyznaczyć według niej PST^o.
4. Wpływ regulacji i wymiany zespołów pojazdu na stabilność otrzymywanych wyników jest znaczny, bowiem powoduje zmianę wartości parametrów diagnostycznych (parametr diagnostyczny przyjmuje wartość nominalną). Skoki wartości parametru powodują zmianę elementów optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych Y^o , jak i składników PST^o.

Szczególnie wrażliwymi elementami są:

- a) współczynnik korelacji liniowej R^2 (tablica 4.4),
- b) wartość funkcji wagi w_j (tablica 4.3),
- c) składniki PST^o (rysunki 4.3-4.5, tablica 4.3).

W przypadku wymiany lub regulacji zespołów pojazdu lub zmiany warunków eksploatacji pojazdu, należy przeprowadzić diagnozowanie wszystkich układów pojazdu i zmniejszyć horyzont prognozy w celu określenia stabilności PST^o w zależności od powyższych czynników.

5. Minimalna liczba elementów szeregu czasowego oraz niezbędna liczba elementów szeregu czasowego przed czasem t_b zależy od rozwiązania optymalnego x_2^o . W przypadku gdy $x_2^o = x_{2,3}$, należy dysponować do obliczeń co najmniej 10 punktami szeregu czasowego, zaś w przypadku gdy $x_2^o = x_{2,1}$ należy dysponować do obliczeń co najmniej 6 punktami szeregu czasowego (4.5). Należy też dążyć do stałej wartości „kroku czasowego” szeregu czasowego, w przeciwnym razie należy spodziewać się dużych wartości błędu prognozy e_p i promienia r_σ , jak ma to miejsce w przypadku silnika UTD-20.

Prezentowane wyniki badań weryfikacyjnych opracowanej metody wyznaczania PST^o i badań jej wrażliwości na niektóre czynniki wynikające z warunków eksploatacji pojazdów oraz sformułowane na ich podstawie wnioski pozwalają stwierdzić (spełnienie warunków akceptacji optymalnej prognozy - patrz punkt 4.1), że opracowana metoda wyznaczania PST^o może być wykorzystana w strategii obsługiwanego pojazdów mechanicznych według stanu technicznego.

Propozycję koncepcji wykorzystania PST^o w eksploatacji, a także w pozostałych fazach istnienia pojazdów mechanicznych przedstawiono w następnym rozdziale pracy.

ROZDZIAŁ 5

WYKORZYSTANIE PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO W EKSPLOATACJI POJAZDÓW MECHANICZNYCH

Użytkownik podsystemu rozpoznawania stanu pojazdów (rys.1.1) na podstawie otrzymywanych informacji (wyniki prognozy PST) tworzy informację sterującą utrzymanie pojazdu w stanie zdatności.

Niezbędnym elementem takiego sterowania jest odpowiedni algorytm, który zawiera trzy zasadnicze elementy badań diagnostycznych pojazdu:

- badanie i ocenę stanu technicznego układów i zespołów pojazdu,
- lokalizację uszkodzeń,
- przewidywanie rozwoju zmian stanów (PST).

Algorytm sterowania utrzymanie w stanie zdatności obiektów technicznych został przedstawiony w pracy [65]. Na podstawie przeprowadzonych badań własnych [99] dla pojazdu mechanicznego z uwzględnieniem procesu prognozowania, opracowano algorytm sterowania utrzymanie w stanie zdatności pojazdu mechanicznego wykorzystującego optymalną prognozę (PST^o) (rys.5.1).

Jednym z zasadniczych działań w schemacie (rys.5.1) jest badanie stanu technicznego układów pojazdu, według algorytmów kontroli stanu D_{KS} . Jeżeli układ jest zdalny, następuje prognozowanie jego stanu technicznego (jak określono w niniejszej pracy w przypadku obsługi według stanu, sprowadza się do ustalenia terminu następnego diagnozowania układu pojazdu). Następnie wykonuje się niezbędne czynności obsługi (np. wymianę płynów eksploatacyjnych, smarowanie).

W przypadku niezdatności należy ustalić przyczyny niezdatności, usunąć je (wymiana lub regulacja zespołów) i skontrolować stan układu lub zespołu.

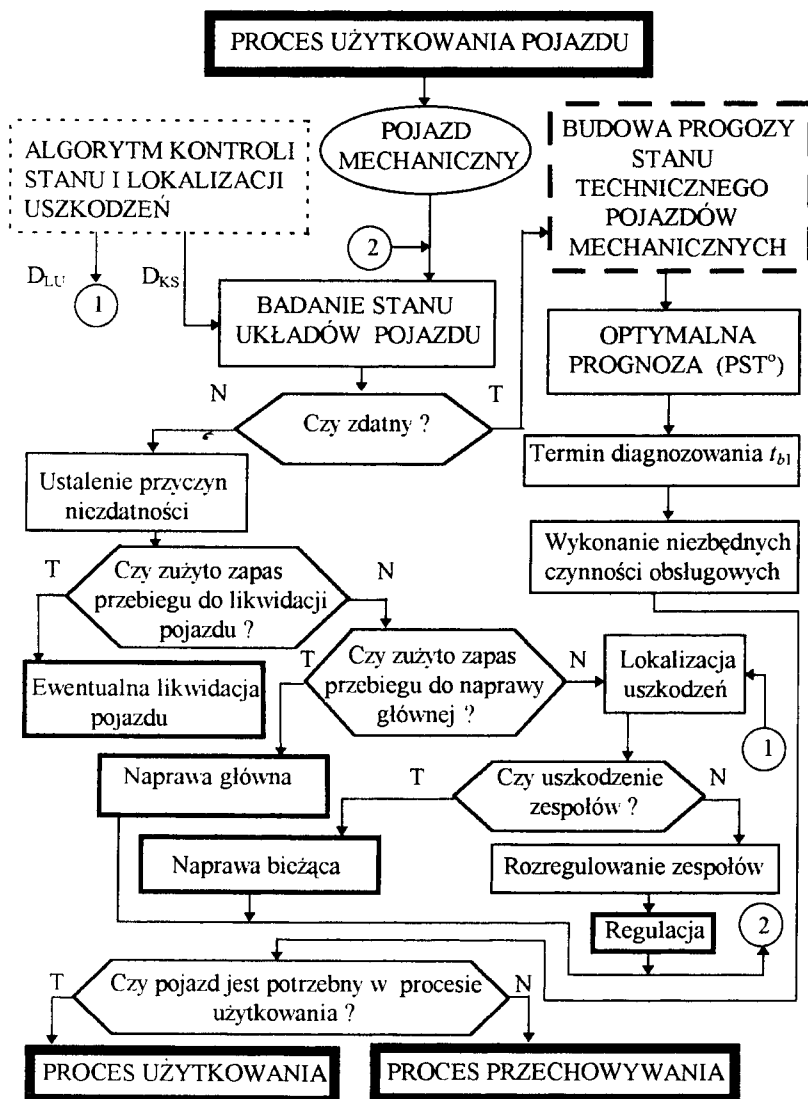
Następny krok to prognozowanie i wykonanie czynności zgodnie z algorytmem sterowania (rys. 5.1).

Przewidywanie stanu układów i zespołów pojazdu ma w tym przypadku sens profilaktyczny, zapobiegający wystąpieniu przyszłych stanów niezdatności. Należy zwrócić uwagę na to, że termin kolejnego diagnozowania układów lub zespołów pojazdu nie jest stały, uwarunkowany bowiem jest ich stanem w chwili poprzedniej. Zatem istota proponowanego algorytmu sprowadza się nie do wykrywania uszkodzonych układów lub zespołów pojazdu, a do zapobiegania występowaniu tych uszkodzeń.

W celu realizacji powyższego algorytmu użytkownik powinien dysponować zbiorem odpowiednich procedur:

- kontroli stanu układów i zespołów pojazdu D_{KS} ,
- lokalizacji uszkodzeń układów i zespołów D_{LU} ,
- prognozowania stanu technicznego pojazdu.

W przypadku procedur kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń układów i zespołów pojazdów istnieje bogata literatura w postaci instrukcji obsługi pojazdów (wydawnictwa producenta) lub w postaci procesów technologicznych diagnozowania (wydawnictwa branżowe użytkownika).



Rys. 5.1. Algorytm sterowania utrzymania pojazdów w stanie zdatności

W przypadku procedur prognozowania autor proponuje wykorzystać opracowaną i zweryfikowaną metodę wyznaczania optymalnej prognozy (PST°) dla układów i zespołów pojazdów według następującego schematu.

A. W etapie wdrożenia metody:

1. Opracowanie sposobu gromadzenia danych w celu „uruchomienia” prognozy poprzez określenie:

- Wartości „kroku czasowego” szeregu czasowego wartości parametrów diagnostycznych. Ze względu na to, że za wartość „horyzontu czasowego prognozy” przyjęto

krotność wartości „kroku czasowego” w przedziale (t_1, t_b) oraz ze względu na możliwości użytkownika (intensywność użytkowania i baza obsługowa) i z konieczności dopasowania wartości „kroku czasowego” do obowiązujących wartości przebiegu pojazdów do OT-1, przyjęto dla :

- samochodów osobowych - 4000 km,
- samochodów ciężarowych - 2000 km,
- pojazdów gaśnicowych - 500 km.

W przypadku pojazdów gaśnicowych stanowi to połowę wartości przebiegu do OT-1, w pozostałych przypadkach jest to wartość przebiegu do OT-1. Ewentualne zmniejszenie wartości przebiegów może być wymuszone zmianą warunków eksploatacji pojazdu lub skokową zmianą wartości parametrów diagnostycznych.

- Liczby parametrów diagnostycznych. Według przyjętych wartości „kroku czasowego” szeregu czasowego należy rejestrować wartości parametrów diagnostycznych układów pojazdu.
- Początku rejestracji wartości parametrów diagnostycznych i estymacji elementów (czas t_1). Dla pojazdów nowych proponuje się przyjąć chwilę zakończenia docierania zespołów pojazdu - najczęściej określony przez producenta, odpowiednio dla :
 - samochodów osobowych - 2000 km,
 - samochodów ciężarowych - 3000 km,
 - pojazdów gaśnicowych - 200 km.

2. Opracowanie obudowy informatycznej wykorzystania optymalnej prognozy (PST^o). Autor proponuje trzy warianty opracowań w zależności od możliwości i wymagań użytkownika:

- a. **Obudowa informatyczna pokładowego systemu diagnostyczno - sterującego pojazdu wykorzystującego optymalną prognozę PST^o;**
- b. **Obudowa informatyczna stacjonarnego systemu diagnostyczno - prognostycznego pojazdów wykorzystującego optymalną prognozę PST^o;**
- c. **Obudowa informatyczna podsystemu diagnostyczno - prognostycznego informatycznego systemu eksploatacji pojazdów zakładu transportu samochodowego lub jednostki wojskowej.**

W każdym przypadku opracowana obudowa informatyczna powinna zapewnić:

- a) wczytanie parametrów diagnostycznych z kolejnych elementów szeregu czasowego i utworzenie zbioru PARAMETR o strukturze:
 - marka i typ pojazdu,
 - nr rejestracyjny pojazdu,
 - kod parametru (układ, parametr),
 - nazwa parametru,
 - jednostka miary parametru,
 - wartości graniczne parametru,
 - wartość przebiegu pojazdu,
 - wartość chwilowa parametru,
 - optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych (wyznaczenie zbioru Y^o i zbioru wartości funkcji wagi $\{w_j\}$),
- b) założenie i aktualizacja zbioru informacji prognostycznej (terminy kolejnego diagnozowania układów lub zespołów pojazdu - t_{bi}^i), zbiór PROGNOZA o strukturze:

- marka i typ pojazdu,
- nr rejestracyjny pojazdu,
- nazwa układu lub zespołu pojazdu,
- prognozowany przebieg t_{b1}^i , przy którym powinno wystąpić diagnozowanie i -tego układu lub zespołu pojazdu,
- prognozowany przebieg t_{b1}^P , przy którym powinno wystąpić diagnozowanie pojazdu,
- czynności diagnostyczno-obługowe przy diagnozowaniu pojazdu,
- generowanie informacji o minimalnej liczbie elementów szeregu czasowego niezbędnej do wyznaczenia PST^o,
- informacja o wymianach płynów eksploatacyjnych,
- informacja o uszkodzeniach układów i zespołów pojazdu,
- informacja o terminach diagnozowania układów i zespołów pojazdu narzuconych przez producenta
- wydruk wyników realizacji metody i informacji prognostycznej lub wyświetlenie ich na monitorze (dla pokładowego lub stacjonarnego systemu diagnostyczno - prognostycznego) - WY-1.

3. Opracowanie schematu wykorzystania informacji prognostycznej przez użytkowników (służba logistyczna zakładu transportu samochodowego i jednostki wojskowej oraz kierowcy pojazdów) w zależności od realizowanego wariantu wykorzystania metody.

4. Na podstawie rejestrowanych wartości parametrów diagnostycznych (przy wykorzystaniu metody wyznaczenia PST^o) estymacja składników PST^o z równoczesną informacją o momencie rozpoczęcia aktywnej prognozy (minimalna liczba elementów szeregu czasowego niezbędnych do wyznaczenia optymalnej PST^o (3.52) - czas t_b) - zbiór PROGNOZA, mając na względzie poniższe uwarunkowania :

- W przypadku uszkodzeń układu pojazdu dokonać pomiaru wartości parametrów diagnostycznych pojazdu, zaś w układzie uszkodzonym - także po naprawie bieżącej (wymianę zespołu, regulację). Uwaga ta nie dotyczy wariantu z pokładowym systemem diagnostyczno - sterującym, bowiem rejestracja wartości parametrów diagnostycznych powinna odbywać się w sposób ciągły lub z regulowaną częstotliwością próbkowania.
- W przypadku, gdy parametry diagnostyczne nie przyjmują wartości przedziału wyznaczonego przez promień $r_\sigma [(1-\gamma)=0,95]$ (opcja czerwona) - nie należy wykonywać czynności regulacyjnych układów i zespołów pojazdu.

B. W etapie użytkowania metody

1. Przy następnych diagnozowaniach pojazdu kontynuować czynności z poprzedniego punktu (A4) mając na uwadze dodatkowe uwarunkowania:

- Maksymalną wartość „horyzontu czasowego prognozy” wyznacza się na podstawie (3.50) (przy akceptowanym przez użytkownika maksymalnym błędzie prognozy e_p^{\max});
- Jako termin kolejnego diagnozowania pojazdu t_{b1}^P przyjmuje się minimalną wartość terminu następnego diagnozowania układów lub zespołów t_{b1}^i ;
- W przypadku zmiany warunków eksploatacji pojazdu oraz w przypadku realizacji strategii obsługiwanego według stanu technicznego za pomocą stacjonarnego lub pokładowego systemu diagnostyczno - prognostycznego, w celu weryfikacji wyników procesu prognozowania, podczas kolejnego diagnozowania pojazdu należy przepro-

wadzić diagnozowanie dla wszystkich układów pojazdu. Należy wówczas przeprowadzić także optymalizację zbioru parametrów diagnostycznych i optymalizację metod prognozowania według opracowanej w pracy metody. Pozwala to wybrać „najlepszy” zestaw procedur procesu prognozowania w każdym punkcie „życia” układów i zespołów pojazdu z możliwością zmiany progów alarmowych (opcja zielona, opcja żółta, opcja czerwona - patrz punkt 2.1) przez użytkownika metody poprzez:

- zmianę wartości współczynnika ufności przedziału błędu prognozy, np. $(1 - \gamma) = 0,99; 0,95; 0,9$;
- zmianę wartości granicznej parametrów diagnostycznych według preferencji użytkownika, np. poprzez wprowadzenie dodatkowej wartości granicznej parametru diagnostycznego niższej (przy $y_j(t_b) < y_{jg}$) lub wyższej (przy $y_j(t_b) > y_{jg}$) od wartości y_{jg} , której przekroczenie przez granicę przedziału (określonej przez r_σ) sygnalizuje, np. uszkodzenie układu lub zespołu pojazdu.

2. W przypadku realizacji oprogramowania pokładowego systemu diagnostyczno - sterującego, wykorzystującego optymalną prognozę (patrz A2a), należy zastosować :

- Procedury wyznaczania optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych Y^o do opracowania w fazie projektowania i konstruowania pojazdu :
 - liczby i miejsc rozmieszczenia punktów pomiarowych parametrów diagnostycznych układów lub zespołów pojazdu,
 - rodzaju monitorowania (tryb *on line* lub *off-line*) z użyciem czujników zainstalowanych na stałe w wyznaczonych punktach pomiarowych układów lub zespołów pojazdu w zależności od częstotliwości próbkowania, o której decyduje rodzaj parametru i sposób jego pomiaru (np. szybkie zmiany wartości parametru diagnostycznego w czasie eksploatacji pojazdu oraz pomiar stanów dynamicznych, np. w metodzie przyspieszeń pomiaru strat mocy silnika w warunkach niestabilnych, preferują tryb *on line*),
 - sposobu przetwarzania sygnałów wejściowych parametrów diagnostycznych (rodzaj przetworników, rodzaj i liczba modułów wejścia),
 - oprogramowania użytkowego systemu w zakresie wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych.
 - Procedury określenia optymalnej metody prognozowania i wyznaczenia PST^o do opracowania:
 - programów użytkowych systemu w zakresie wyznaczenia optymalnej prognozy i archiwizacji informacji diagnostyczno-prognostycznej układów lub zespołów pojazdu,
 - adaptacyjnej strategii monitorowania umożliwiającej zmianę nastaw pomiarowych systemu (optymalny zbiór parametrów diagnostycznych, wartości progów alertowych (opcja żółta) i alarmowych (opcja czerwona), optymalna metoda prognozowania) w zależności od zmian stanu układu pojazdu (wymiana lub regulacja zespołu) oraz od zmian warunków eksploatacji pojazdu).
3. W przypadku realizacji obudowy informatycznej w postaci oprogramowania stacjonarnego systemu diagnostyczno-prognostycznego wykorzystującego PST^o (patrz A2b) wykorzystać procedury wyznaczania optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych Y^o i procedury wyboru optymalnej metody prognozowania oraz wyznaczenia PST^o do opracowania w fazie konstruowania, wytwarzania i eksploatacji pojazdów:

- Rodzaju monitorowania (tryb *off-line*) z użyciem czujników zainstalowanych na stałe w wyznaczonych punktach pomiarowych układów lub zespołów pojazdu i połączonych z gniazdem diagnostycznym dla całego pojazdu lub wybranych układów pojazdu (np. silnika spalinowego, układów bezpieczeństwa jazdy);
- Pakietu programów użytkowych umożliwiających :
 - wyznaczenie optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych ze zbiorem wartości funkcji wagi,
 - wyznaczenie optymalnej prognozy (PST^o),
 - archiwizację informacji diagnostyczno - prognostycznej,
 - opracowane adaptacyjnej strategii monitorowania umożliwiającej zmianę nastaw pomiarowych systemu.

4. W przypadku realizacji wariantu automatyzacji systemu eksploatacji (patrz A2c) wykorzystać wyznaczone przez program # PST (Prognoza Stanu Technicznego) informacje prognostyczne (terminy i zakres czynności diagnostyczno-obsługowych pojazdu) przez służby logistyczne zakładu transportu samochodowego i jednostki wojskowej w zakresie:

- Użytkowania - dostarczenie informacji o dyspozycji do pracy przewozowej pojazdów w postaci:
 - planowania i koordynacji przewozów,
 - dyspozycji pojazdów do pracy przewozowej,
 - obsługiwanian, dostarczenie informacji o diagnozowaniu i naprawie pojazdu w postaci:
 - * planowania terminów i zakresu diagnozowania pojazdu,
 - * planowania napraw, w tym też napraw głównych pojazdu,
 - * planowania pracy stanowisk obsługowo-naprawczych w warsztacie naprawczym,
 - * planowania potrzeb części zamiennych;
- Informowania kierownictwa zakładu transportu samochodowego lub jednostki wojskowej o wykorzystaniu potencjału przewozowego i zaplecza technicznego.
Ze względu na konieczność gromadzenia, przetwarzania i przechowywania dużej ilości informacji diagnostyczno-prognostycznej, autor uważa, że konieczne byłoby opracowanie odpowiedniego systemu informatycznego eksploatacji pojazdów mechanicznych, będącego częścią składową systemu informatycznego ZTS lub JW. Założenie, koncepcja i projekt ogólny takiego systemu przedstawione zostały w pracy autora [102].

Reasumując powyższe rozważania oraz wyniki badań weryfikacyjnych metody stwierdza się, że opracowana metoda wyznaczenia optymalnej prognozy (PST^o) może i powinna stanowić element sterowania utrzymania pojazdu w stanie zdatności, zaś jej zastosowanie powinno obejmować:

1. W etapie wdrożenia:
 - a) wyznaczenie optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych,
 - b) wyznaczenie optymalnej metody prognozowania,
 - c) opracowanie sposobu wykorzystania informacji diagnostyczno-prognostycznej przez służby techniczne ZTS lub JW według przedstawionych powyżej zaleceń,
 - d) automatyzację systemu eksploatacji pojazdów mechanicznych według przedstawionych powyżej wariantów.

2. W etapie użytkowania:

- a) realizację procesu eksploatacji według schematu utrzymania pojazdu w stanie zdatności z wykorzystaniem, generowanych przez program # PST, informacji prognostycznych (dla wariantu 2c),
- b) wykorzystanie przez służby logistyczne ZTS lub JW informacji z informatycznego systemu eksploatacji w celu określenia:
 - wykorzystania potencjału przewozowego pojazdów,
 - wykorzystania zaplecza technicznego,
 - planowania zaopatrzenia w części zamienne i materiały eksploatacyjne pojazdów mechanicznych;
- c) wykorzystanie przez kierowców i mechaników informacji diagnostyczno - prognostycznych generowanych przez pokładowy lub stacjonarny system diagnostyczno-prognostyczny w celu zwiększenia efektywności eksploatacji pojazdu mechanicznego poprzez:
 - ciągłe (system pokładowy) lub okresowe (system stacjonarny) monitorowanie stanu technicznego układów lub zespołów pojazdu z możliwością wczesnego wykrycia uszkodzenia (opcja żółta),
 - planowania terminów diagnozowania pojazdu (terminy diagnozowania układów lub zespołów $\{t_{b1}^i\}$, termin pojazdu t_{b1}^p),
 - planowania napraw układów lub zespołów pojazdu (osiągnięcie przez parametr diagnostyczny przedziału wartości granicznych - opcja czerwona),
 - planowania pracy stanowisk obsługowo-naprawczych w warsztacie naprawczym,
 - planowania potrzeb części zamiennych.

Przedstawione powyżej zalecenia, sformułowane w postaci koncepcji wykorzystania PST^o, odnoszą się do opracowanego w pracy schematu wyznaczania optymalnej prognozy pojazdów mechanicznych oraz uzyskanych wyników weryfikacji opracowanej metody.

Ze względu na zaproponowany niezbyt liczny zbiór rozwiązań dopuszczalnych X_1 (zbiór metod wyboru parametrów diagnostycznych) i X_2 (zbiór metod prognozowania) oraz stosunkowo małą liczbę kryteriów cząstkowych funkcji kryterialnych F_1 (kryteria wyboru parametrów diagnostycznych) i F_2 (kryteria metod prognozowania) nie można sformułować konkluzji, że opracowana metoda wyznaczania prognozy i przedstawiona koncepcja wykorzystania prognozy noszą charakter ostateczny i mogą stanowić gotowy projekt systemu diagnostyczno-prognostycznego pojazdów mechanicznych.

Uzyskane jednak wyniki weryfikacji metody i zaproponowana na ich podstawie koncepcja wykorzystania optymalnej prognozy w eksploatacji we wszystkich fazach istnienia pojazdów może stanowić podstawę do dalszych prac w sferze aplikacji softwaru i hardware'u systemu diagnostyczno-prognostycznego pojazdów mechanicznych.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W celu zwiększenia efektywności eksploatacji pojazdów mechanicznych poszukuje się nowych strategii eksploatacji. Jednym z przejawów tej działalności jest propozycja strategii obsługi pojazdów według stanu technicznego, która wymaga wyznaczenia prognozy stanu technicznego pojazdów jako terminu ich kolejnego diagnozowania.

Z przeglądu wydawnictw książkowych, publikacji naukowych i z doświadczenia eksploatacyjnego wynika, że opracowania, które w ostatnich latach pojawiły się w kraju i za granicą, dotyczą przede wszystkim wykorzystania metod prognostycznych w diagnozowaniu maszyn. W małym zaś stopniu stosowane są jako algorytmy obliczeniowe w prognozowaniu stanu technicznego pojazdów mechanicznych.

Jest także mało opracowań, które za pomocą narzędzi optymalizacji wielokryterialnej, starałyby się rozwiązać problem prognozowania stanu technicznego pojazdu według algorytmu:

stan techniczny pojazdu → parametry diagnostyczne opisujące ten stan → metoda prognozowania wykorzystująca parametry diagnostyczne → prognoza stanu technicznego pojazdu (termin diagnozowania) → wykorzystanie prognozy stanu technicznego w eksploatacji pojazdu.

Praca zawiera pakiet propozycji dotyczących rozwiązania problemu procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów według powyższego algorytmu i stanowi próbę teoretycznego opracowania:

1. Metody wyznaczenia prognozy stanu technicznego pojazdów mechanicznych (terminu diagnozowania), możliwej do wykorzystania w strategii obsługi pojazdów według stanu technicznego.
2. Wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego układów lub zespołów pojazdów wraz z praktyczną weryfikacją rozważań teoretycznych w odniesieniu do pojazdów mechanicznych.

W sferze merytorycznej pracy można wydzielić cztery problemy:

1. Opracowanie metody wyznaczenia prognozy stanu technicznego jako terminu diagnozowania układów lub zespołów pojazdu mechanicznego.
2. Sformułowanie zadania optymalizacji wyznaczenia prognozy oraz przedstawienie schematu jego rozwiązania.
3. Weryfikację problemu 1 i problemu 2 wyrażoną w postaci badania optymalnej prognozy stanu technicznego (PST^o) w zależności od czynników charakterystycznych dla eksploatacji pojazdów mechanicznych.
4. Opracowanie koncepcji wykorzystania PST^o w eksploatacji, a także w pozostałych fazach istnienia pojazdów mechanicznych.

Wymienione problemy stanowią główny wątek pracy i stanowią jej zakres.

Pod względem układu treści pracę można podzielić na pięć części.

W pierwszej części pracy zawarto zagadnienia związane z prognozowaniem stanu technicznego układów i zespołów pojazdów, zależnością parametrów diagnostycznych od stanu technicznego, strategią obsługi według stanu technicznego i konieczno-

ścią wyznaczania dla niej terminów kolejnego diagnozowania pojazdów, możliwością wykorzystania metod prognozowania do wyznaczenia prognozy stanu technicznego zespołów pojazdów i optymalizacją etapów procesu prognozowania.

Druga część pracy zawiera propozycję metody wyznaczania prognozy jako terminu kolejnego diagnozowania układów lub zespołów pojazdu, propozycję konstruowania optymalnej prognozy wraz ze zbiorami rozwiązań dopuszczalnych (metody wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych i metody prognozowania) oraz propozycję zbioru kryteriów cząstkowych funkcji kryterialnej zadania optymalizacyjnego.

Część trzecia to propozycja rozwiązania zadań polioptymalizacji wraz z algorytmami wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego i oceną jej wrażliwości na niektóre czynniki eksploatacyjne, charakterystyczne dla pojazdów mechanicznych.

W części czwartej zweryfikowano praktycznie rozważania teoretyczne zawarte w częściach pierwszej, drugiej i trzeciej, w odniesieniu do układów i zespołów pojazdów charakteryzujących się:

- a) największą wartością prawdopodobieństwa występowania uszkodzeń (silnik spalinowy, układ napędowy, instalacja elektryczna pojazdu);
- b) wpływem na bezpieczeństwo jazdy (układ hamulcowy, układ jezdny pojazdu, instalacja elektryczna pojazdu);
- c) zróżnicowanym charakterem zużycia (silnik spalinowy, instalacja elektryczna, układ napędowy, układ hamulcowy).

W części piątej zaproponowano koncepcję wykorzystania w warunkach zakładu transportu samochodowego lub jednostki wojskowej opracowanych i zweryfikowanych w pracy procedur wyznaczania optymalnej prognozy stanu technicznego podczas projektowania, konstruowania i eksploatacji pojazdów mechanicznych.

Zdaniem autora, do najbardziej istotnych i oryginalnych elementów pracy można zaliczyć:

1. Przedstawienie problematyki prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych z punktu widzenia strategii obsługiwanego według stanu technicznego. Umożliwiło to określenie prognozy jako terminu diagnozowania pojazdów mechanicznych (punkt 1.1).
2. Opracowanie algorytmu optymalizacji procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych (punkt 1.2). Obejmuje on:
 - a) wyznaczenie zbioru rozwiązań dopuszczalnych;
 - metody wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych,
 - metody prognozowania,
 - b) wyznaczenie funkcji kryterialnej;
 - kryteria wyznaczania parametrów diagnostycznych,
 - kryteria wyboru metody prognozowania,
 - c) rozwiązanie zadania optymalizacji wielokryterialnej i wyznaczenie optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych i optymalnej metody prognozowania,
 - d) badania weryfikacyjne metody wyznaczenia optymalnej prognozy (PST^o),

- e) opracowanie sposobu wykorzystania PST^o w strategii obsługiwanego pojazdu mechanicznego według stanu technicznego.
3. Opracowanie algorytmu wyznaczania składników prognozy PST. Wykorzystuje on odwzorowanie zmiany stanu układów lub zespołów pojazdu w zmianach wartości parametrów diagnostycznych. Następnie po przyrównaniu wartości chwilowych parametrów diagnostycznych do ich wartości granicznych otrzymuje się, przy założonym poziomie ufności $1-\gamma$, termin kolejnego diagnozowania pojazdu mechanicznego t_{b1} (punkt 2.1).
 4. Opracowanie metod wyznaczania parametrów diagnostycznych oraz ustalenie i identyfikacja (połączona z modyfikacją) metod prognozowania, będących rozwiązaniami dopuszczalnymi zadania optymalizacyjnego (punkt 2.2).
 5. Ustalenie i identyfikacja kryteriów optymalizacji wyznaczania parametrów diagnostycznych i wyboru metody prognozowania (punkt 2.3).
 6. Ustalenie i modyfikacja metody rozwiązania zadania optymalizacji wielokryterialnej jako rozwiązania kompromisowego z normą dla parametru $p=2$.
Rozwiązania optymalne (x_1^o, x_2^o) wyznaczane są spośród rozwiązań niezdominowanych i są wówczas wynikiem najbliższym wynikowi idealnemu (punktowi idealnemu) w sensie „odległości geometrycznej” (punkt 2.4).
 7. Sformułowanie zadań optymalizacji wielokryterialnej wyznaczania prognozy PST^o, opracowanie algorytmów rozwiązań zadań optymalizacji wraz z koncepcją ich implementacji (punkt 3.1, 3.2).
 8. Opracowanie metod badania wrażliwości optymalnych rozwiązań x_1^o, x_2^o na czynniki charakterystyczne dla eksploatacji pojazdów mechanicznych (punkt 3.3) :
 - a) zmianę niezawodności zespołów pojazdów wynikającą z ich regulacji lub wymiany;
 - b) zmienne warunki eksploatacji (warunki klimatyczne, warunki terenowe, jakość obsługiwanego);
 - c) zmienną wartość „horyzontu czasowego prognozy”, wynikającą z różnorodności wykonywanych zadań przewozowych przez pojazdy mechaniczne;
 - d) wieloelementowy zbiór parametrów diagnostycznych;
 - e) małą liczebność elementów szeregu czasowego i zmienną wartość „kroku czasowego” szeregu czasowego.
 9. Opracowanie programu badań weryfikacyjnych metody wyznaczenia optymalnej prognozy (PST^o) i jego realizacja w celu uzyskania informacji niezbędnych do opracowania koncepcji wykorzystania metody w strategii obsługiwanego pojazdu mechanicznego według stanu technicznego (punkt 4).
 10. Opracowanie koncepcji wykorzystania optymalnej prognozy (PST^o) w strategii obsługiwanego pojazdu mechanicznego według stanu technicznego z możliwością jej wykorzystania (punkt 5):
 - a) w pokładowym systemie diagnostyczno - sterującym pojazdu mechanicznego,
 - b) w stacjonarnym systemie diagnostyczno - prognostycznym pojazdów mechanicznych zakładu transportu samochodowego, jednostki wojskowej lub stacji kontroli pojazdów,
 - c) w podsystemie diagnostyczno - prognostycznym informatycznego systemu eksploatacji pojazdów mechanicznych zakładu transportu samochodowego lub jednostki wojskowej.

Zdaniem autora, do najistotniejszych wyników ogólnych uzyskanych w pracy można zaliczyć:

1. Opracowanie metody wyznaczania prognozy PST jako terminu diagnozowania pojazdów mechanicznych.
2. Opracowanie metody wyznaczania optymalnej prognozy (PST^o) układów lub zespołów pojazdów mechanicznych (w tym wyznaczenie optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych i optymalnej metody prognozowania).
3. Opracowanie metod badania wrażliwości uzyskanych rozwiązań optymalnych.
4. Udoskonalenie eksploatacji pojazdów mechanicznych poprzez rozwiązanie problemu wyznaczania optymalnego terminu kolejnego diagnozowania pojazdów mechanicznych.

Niektóre z przedstawionych w pracy idei wymagają dalszych badań, jednak przeprowadzona analiza pod kątem ich praktycznego zastosowania, pozwala sformułować następujące wnioski:

1. Optymalna prognoza (PST^o) może i powinna stanowić niezbędny element strategii obsługiwanego pojazdu mechanicznego według stanu, umożliwia bowiem optymalizację terminu diagnozowania pojazdów mechanicznych.
2. Zaprezentowana w pracy metoda konstruowania optymalnej prognozy (PST^o) wraz ze sformułowanymi zadaniami optymalizacji okazała się przydatna, ponieważ generuje optymalny termin diagnozowania, zaś uzyskane wyniki mieszczą się w zakresie założonych dokładności.
3. Algorytmizacja rozwiązań i przedstawiona propozycja implementacji stwarza możliwość ich wykorzystania przy konstruowaniu pokładowych i stacjonarnych systemów diagnostycznych oraz opracowania informatycznego systemu eksploatacji pojazdów mechanicznych.
4. Przedstawiona w pracy koncepcja wykorzystania PST^o w eksploatacji pojazdów powinna stanowić element procesu decyzyjnego systemu utrzymania w zdatości pojazdów mechanicznych.
5. Możliwe jest zastosowanie proponowanych rozwiązań, ze względu na podobną problematykę ich eksploatacji, dla innych urządzeń technicznych (np. maszyn budowlanych, ciągników rolniczych).

W treści pracy występuje także wiele elementów mogących wskazywać kierunki dalszych badań nad prognozowaniem stanu technicznego pojazdów. Dlatego też, zdaniem autora, doskonalenie tego procesu powinno być realizowane poprzez:

- a) zwiększenie liczebności rozwiązań dopuszczalnych (metod wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych, metod prognozowania),
- b) zwiększenie liczebności kryteriów cząstkowych funkcji kryterialnej,
- c) weryfikację opracowanej metody wyznaczania PST^o dla wszystkich układów pojazdu mechanicznego,
- d) automatyzację procesu eksploatacji poprzez zaprojektowanie i skonstruowanie pokładowych lub stacjonarnych automatycznych środków diagnostycznych oraz informatycznego systemu eksploatacji pojazdów mechanicznych wykorzystujących PST^o.

Wstępne prace nad stworzeniem systemów, wykorzystujących opracowaną w niniejszej pracy metodę wyznaczania PST^o są już obecnie w kraju prowadzone, np. w postaci automatyzacji systemu eksploatacji wozów bojowych, konstrukcji prototypów urządzeń sterująco-diagnostycznych wozów bojowych, konstrukcji prototypów urządzeń racjonalnej eksploatacji ciągników rolniczych i maszyn budowlanych czy też w postaci wymagań konstrukcyjno-eksploatacyjnych wozów bojowych III generacji.



LITERATURA

- [1] Ameljańczyk A.: Optymalizacja wielokryterialna, WAT, Warszawa 1986.
- [2] Ameljańczyk A.: Optymalizacja wielokryterialna w problemach sterowania i zarządzania, Wydawnictwo PAN, Warszawa 1984.
- [3] Ameljańczyk A.: Wektorowa optymalizacja rozwiązania w modelach decyzyjnych ze szczególnym uwzględnieniem modeli growych, Rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa 1979.
- [4] Batko W.: Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej, Rozprawa habilitacyjna, AGH, Kraków 1984.
- [5] Bendat J. S., Piersol A.G.: Metody analizy i pomiarów sygnałów losowych, PWN, Warszawa 1976.
- [6] Będkowski L.: Elementy diagnostyki technicznej, WAT, Warszawa 1991.
- [7] Będkowski L., Dąbrowski T.: Prognozowanie właściwości systemu antropotechnicznego w oparciu o trajektorie efektowe, Materiały I Kongresu Diagnostyki Technicznej, Gdańsk 1996.
- [8] Биргер И. А.: Техническая диагностика, Наука, Москва 1978.
- [9] Bobin F.: O kompleksowej metodzie prognozowania stanu technicznego obiektu złożonego, Biuletyn WAT, nr 9/1979, Warszawa 1979.
- [10] Bobin F.: Optymalne metody wyboru cech do modelu diagnostyczno – prognostycznego, Cz. I,II. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, nr 21/1986, nr 22/1987, Kraków 1986-1987.
- [11] Bowerman B.L., O'Connell R.T.: Forecasting and Time Series, Duxbury Press (USA), 1979.
- [12] Box G., Jenkins G.: Time series analysis, forecasting and control, London 1970.
- [13] Bright J. R. i inni: Prognozowanie w technice, WNT, Warszawa 1978.
- [14] Brown R.G.: Smoting, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series, Prentice Hall, 1963.
- [15] Brown R.G.: Statistical Forecasting for Inventory Control, Mc Graw-Hill, New York 1959.
- [16] Brown R.G., Mayer R.F.: The Fundamental Theorem of Exponential Smoting, Operations Research, No 9, 1961.
- [17] Cempel Cz.: Ewolucyjne modele symptomowe w diagnostyce maszyn, Materiały I Kongresu Diagnostyki Technicznej, Gdańsk 1996.
- [18] Cempel Cz.: Proste metody prognozowania stanu w drganiowej diagnostyce maszyn, Materiały VII Szkoły Diagnostyki, Poznań - Rydzyna 1985.
- [19] Cempel Cz.: Redukcja zbioru danych w diagnostyce maszyn, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, nr 4/1980, Warszawa 1980.

- [20] Cempel Cz.: Theory of energy transforming systems and its application in diagnostic of systems, I Seminarium „Wibroakustyka w systemach technicznych”, Warszawa 1994.
- [21] Cempel Cz., Bossak J., Żółtowski B.: Proste metody prognozowania stanu maszyn, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, nr 3/1989, Kraków 1989.
- [22] Cempel Cz. i inni: Optymalizacja symptomowych modeli prognostycznych dla celów diagnostyki technicznej, Materiały III Konferencji „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów”, Szczyrk 1995.
- [23] Cholewa W.: Systemy doradcze w diagnostyce technicznej, Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej „Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów”, Bydgoszcz 1994.
- [24] Cholewa W., Solipiwo A.: Optymalizacja przestrzeni cech w wibroakustycznych badaniach diagnostycznych, Materiały VII Szkoły Diagnostyki, Poznań - Rydzyna 1985.
- [25] Chow W.M.: Adaptive Control of the Exponential Smoothing Constant, Journal of Industrial Engineering, 16, 1965.
- [26] Cleary J.P., Levenbach H.: The Professional Forecaster: The Forecasting Process through Data Analysis, Lifetime Learning Publ. (USA), 1982.
- [27] Cox D.R.: Prediction by exponentially weighted moving averages and related methods. Journal of the Royal Statistical Society, vol. 2, 1971.
- [28] Чуев Ю.В. и другие: Прогнозирование количественных характеристик процессов, Советское Радио, Москва 1975.
- [29] D'Esopo D.A.: A note on forecasting by the exponential smoothing operator. Operations Research, vol. 9, 1961.
- [30] Dokumentacja badań hamownianych silników UTD-20, WOSS, Piła 1984.
- [31] Dokumentacja badań mikrometrażowych silników UTD-20 i W-46, WZM, Siemianowice 1993-1995.
- [32] Dokumentacja techniczna badań silników UTD-20 i W-46, WZM, Siemianowice 1994.
- [33] Donald D., Gilleland L.: The Abrams; A Sound Investment, Military Technology no 16/1992.
- [34] Faller E. K.: Automated Diagnostic System for Military Trucks, SAE, 760835.
- [35] Ferrard S., Turbe E.: The Leclerc system, Editions BOSQUET, Paris 1992.
- [36] Frandl, Quissek, Winklhorer: Improvement of LEV/ULEV potential of fuel efficient high performance engines, 1992 SAE International Congress & Exposition, New York, USA 1992.
- [37] Fuller E. J.: The Practical Realization of an Automated Diagnostic System for Diesel Powered Vehicles, SAE, 760838.
- [38] Gajdenko W.S.: Optymalizacja diagnostyki systemów, PWN, Warszawa 1972.
- [39] Gant G. C., Alves G. J.: Progress in electrical control of large diesel engines, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power (ISSN 0742-4795) v 112 p 280-6, July'90.

- [40] Гаскаров Д. В.: Прогнозирование технического состояния, Машиностроение, Москва 1987.
- [41] Gerhardt D., Sills T.: Microprocessor Control For Diesel Powered Equipment Diesel Progress, North American, 1987.
- [42] Gołębiowski A., Tylicki H.: Model procesu rozpoznawania stanu technicznego obiektów, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1987.
- [43] Górnzy L., Smokowski R.: Badania diagnostyczne silników UTD-20, Materiały II Sympozjum „Diagnozowanie i prognoza stanu technicznego oraz eksploatacja silników wysokoprężnych”, WOSS Piła 1984.
- [44] Guzik B.: Estymacja punktów zwrotnych trendu i ustalenie horyzontu prognozy, Przegląd Statystyczny nr 20/1973, Warszawa 1973.
- [45] Hadden S.C., Hulls L.R., Sutphin E.M.: Non-Contact Diagnosis of Internal Combustion Engine Faults Through Remote Sensing, SAE, 760146.
- [46] Hebda M., Janicki D.: Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji, WKŁ, Warszawa 1977.
- [47] Hebda M., Niziński S., Pelc H.: Diagnostyka urządzeń mechanicznych, WNT, Warszawa 1984.
- [48] Hellwig Z.: Problem optymalnego wyboru predykant, Przegląd Statystyczny, nr 3-4, Warszawa 1969.
- [49] Instrukcja budowy i obsługi samochodu STAR 200, FSC, Starachowice 1980.
- [50] Kalman R. E., Bucy R. S.: New Results in Linear Filtering and Prediction Theory. Journal of Basic Engineering. 1960, vol. 82.
- [51] Karty oceny stanu technicznego samochodów STAR-29, WOSS, Piła 1985.
- [52] Kaźmierczak J.: Zastosowanie liniowych modeli procesów losowych do prognozowania w diagnostyce maszyn, Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Śląska, Gliwice 1989.
- [53] Kaźmierczak J.: Zastosowanie modeli prognostycznych do wnioskowania w diagnostyce sprężarek, Materiały ESP'86, Łódź 1986.
- [54] Ключев В.В.: Методы и средства измерения диагностических параметров, Машиностроение, Москва 1987.
- [55] Kuchnel B. T., Mingfei Luo: Forecasting machine condition using Grey System Theory. Proceedings of the 2nd International Machinery Monitoring Diagnostics Conference, Los Angeles 1990.
- [56] Leśniewski J.: Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy naukowo-badawczej nt. Badania eksploatacyjne samochodów produkcji FSC Starachowice, IEPM WAT, WAT, Warszawa 1980.
- [57] Marciniak J.: Diagnostyka techniczna kolejowych pojazdów mechanicznych, WKŁ, Warszawa 1982.
- [58] Mauer G.F., Watts R.J.: On-line Cylinder Diagnostics on Combustion Engines by Noncontact Torque and Speed Measurement, SAE Technical Paper Series, 890485.

- [59] Михлин В.М.: Прогнозирование технического состояния машин, Колос, Москва 1976.
- [60] Mitsubishi computered automobile diagnostic system. Intern.Combust. Engine. 1981.
- [61] Montgomery D.C., Johnson L.A.: Forecasting and Time Series Analysis, McGraw-Hill, New York, 1976.
- [62] Мозгалевский А.В.: Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры, Советское Радио, Москва 1974.
- [63] Мозгалевский А.В.: Системы диагностирования, Надужность и эффективность в технике, Машиностроение, Москва 1987.
- [64] Niziński S.: Kryterium stanu technicznego w podsystemie obsługiwanania pojazdów mechanicznych, Rozprawa habilitacyjna, WITPiS, Warszawa 1986.
- [65] Niziński S.: Podstawy dynamicznego systemu eksploatacji obiektów technicznych, WITPiS, Sulejówek 1992.
- [66] Niziński S., Tylicki H.: Koncepcja systemu diagnostycznego, WITPiS, Warszawa 1987.
- [67] Pacut A.: Matematyczne metody prognozowania. Analiza systemowa podstawy i metodologia, PWN, Warszawa 1985.
- [68] Parker K., Miller P. D.: The First Digital Automotive Diagnostic System - Autosense, SAE, 760144.
- [69] Peschel M.: Optymalizacja wielokryterialna. Analiza systemowa. Podstawy i metodologia, PWN, Warszawa 1985.
- [70] Peschel M., Riedel C.: Polioptymalizacja. Metody podejmowania decyzji kompromisowych w zagadnieniach inżynierijno - technicznych, WNT, Warszawa 1979.
- [71] Piętaк A.: Współczesne systemy diagnostyczne silników o ZS, Sprawozdanie z pracy naukowo - badawczej IPM WAT, WAT, Warszawa 1994.
- [72] Polański Z.: Metody optymalizacji w technologii maszyn, PWN, Warszawa 1977.
- [73] Polska Norma PN-EN-29000, Zarządzanie jakością i zapewnienie jakości, PKN, Warszawa 1995.
- [74] Polska Norma PN-IEC 706-5, Badania diagnostyczne, PKN, Warszawa (w przygotowaniu).
- [75] Praca zbiorowa: Poradnik oceny stanu technicznego silnika UTD-20, MON, Warszawa 1985.
- [76] Przychodzień T. i inni: Eksploatacja maszyn roboczych w warunkach zimowych, WNT, Warszawa 1990.
- [77] Rasiowa H.: Wstęp do matematyki współczesnej, PWN, Warszawa 1977.
- [78] Rath H. B.: A Diagnostic System for Vehicles Based on the Monitoring of - Normal Conditions Durning Day - to Day operation, SAE, 740534.
- [79] Reid D.J.: Forecasting in action. A comparision of Forecasting Techniques in Time Series, Proc. of O.R. Society's Group on Long Range Planing and Forecasting, 1971.

- [80] Roy S., Malik O. , Hope G. S.: Adaptive control of speed and equivalence ratio dynamics of a diesel driven power-plant, IEEE Transactions on Energy Conversion, v 8 p 13-19.
- [81] Sarna D., Steyaert J.: Diagnostic Equipment Development for Military Vehicle Applications, SAE Technical Paper Series, 780029.
- [82] Schoug C.A.: Microprocessor, Control and Supervision of Diesel Power Plants, CH 2477- 8/87, 1987 IEEE.
- [83] Sobczak W., Malina W.: Metody selekcji i redukcji informacji, WNT, Warszawa 1985.
- [84] Staniszewski R.: Dynamika rozwoju konstrukcji układów fizycznych, Wydawnictwo PAN, Warszawa 1982.
- [85] Tarnowski W.: Komputerowe wspomaganie projektowania. Wybór na zbiorze skończonym (przeliczalnym), WSI, Koszalin 1991.
- [86] Theil H.: Applied economic forecasting, North-Holland, Amsterdam 1971.
- [87] Theil H., Wage S.: Some observations on Adaptive Forecasting, Management Science, vol. 10, 1964.
- [88] Trigg D.W.: Monitoring a Forecasting System, Operational Research Quaterly, vol. 15,1964.
- [89] Tylicki H.: Badanie stopnia dokładności predykcji w modelu adaptacyjnym Browna, Materiały Szkoły Zimowej „Metody symulacyjne inżynierii niezawodności”, Szczyrk 1989.
- [90] Tylicki H.: Budowa optymalnej diagnozy prognostycznej dla zespołów pojazdu mechanicznego. Biuletyn WAT, nr 5/96, Warszawa 1996.
- [91] Tylicki H.: Koncepcja wykorzystania procesu prognozowania stanu technicznego urządzeń na przykładzie pojazdu mechanicznego, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, nr 1/1995, Kraków 1995.
- [92] Tylicki H.: Optymalizacja metod prognozowania niezawodnego działania urządzeń, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, nr 3/1993, Kraków 1993.
- [93] Tylicki H.: Prognozowanie stanu technicznego samochodu, Materiały konferencyjne AUTOPROGRES `93, Jachranka - Warszawa 1993.
- [94] Tylicki H.: Wybór optymalnej metody prognozowania stanu technicznego urządzeń, Biuletyn WAT nr 9/1992, Warszawa 1992.
- [95] Tylicki H.: Wybór optymalnych metod prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych, Biuletyn WAT, nr 9/1992, WAT, Warszawa 1992.
- [96] Tylicki H.: Wybór parametrów diagnostycznych w procesie prognozowania stanu technicznego, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, nr 4/90, Kraków 1991.
- [97] Tylicki H., Gołębiowski A.: Niektóre problemy prognozowania stanu technicznego obiektów, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, nr 1/91. Kraków 1993.
- [98] Tylicki H., Gołębiowski A.: Wykorzystanie modeli graficznych obiektów złożonych do budowy programów diagnostycznych, Materiały IV Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Diagnostyka urządzeń technicznych”, Tuczno 1983.

- [99] Tylicki H. i inni: Conception of using forecasting technical condition in the exploitation mechanical vehicle, 5th IFAC Symposium On Dynamics And Control Of Processing Systems, DYCOPS-5, Corfu, Greece 1998 (w druku).
- [100] Tylicki H. i inni: Elementy wdrożenia diagnostycznego podsystemu obsługiwanego dla wybranej grupy pojazdów mechanicznych w ZTS "TRANSMEBLE" w Trzciance, Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej, Piła 1989.
- [101] Tylicki H. i inni: Kompleksowa diagnostyka wojskowych pojazdów mechanicznych, Sprawozdanie z pracy naukowo - badawczej, WOSS, Piła 1983.
- [102] Tylicki H., Lisowiec A.: Koncepcja kompleksowego systemu informatycznego Zakładu Transportu Samochodowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 42, Kielce 1988.
- [103] Tylicki H., Łukasik K.: Koncepcja automatycznego urządzenia diagnostycznego instalacji elektrycznej pojazdów mechanicznych, Materiały III Krajowej Konferencji Naukowo - Technicznej „Diagnostyka urządzeń technicznych”, Kielce 1981.
- [104] Uni-Instruments Ltd.: Vibration information meter for predictive maintenance monitoring, London 1986.
- [105] Waszkiewicz L.: Empiryczna weryfikacja procedur prognostycznych, Przegląd Statystyczny, R.18, z. 3-4, Warszawa 1971.
- [106] Waszkiewicz L.: Weryfikacja procedur prognostycznych, PWE, Warszawa 1975.
- [107] Wencel J. S.: Elementy teorii gier, PWN, Warszawa 1961.
- [108] Woropay M. i inni.: Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn, Wydawnictwo ATR, Bydgoszcz 1996.
- [109] Vehicle engine diagnosis; Automatic diagnostic system for diesel-engined road vehicles from Autosense Equipment Inc, Diesel Engineering, Spring 1978.
- [110] Załączniki do sprawozdania z wykonania V etapu pracy pt. Badanie możliwości skrócenia czasu docierania eksploatacyjnego samochodów Star 660 M1 i M2, IEPM WAT, WAT, Warszawa 1970.
- [111] Zeliaś A.: Teoria prognozy, PWE, Warszawa 1984.
- [112] Ziomba S.: Rola diagnostyki technicznej, Diagnostyka Urządzeń Mechanicznych, IPPT PAN, Ossolineum, Wrocław 1977.
- [113] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki technicznej, Wydawnictwo ATR, Bydgoszcz 1996.
- [114] Żółtowski B.: Technical diagnosis information of symptomatic reliability of machines, Journal of Applied Mechanics, American Society of Mechanical Engineering, New York, 1994.
- [115] Żółtowski B.: Uwarunkowania klasyfikowania stanów w diagnostyce maszyn, Zeszyty naukowe Problemy Eksploatacji nr 4/97, ITE Radom 1997.
- [116] Żółtowski B., Ćwik Z.: Leksykon diagnostyki technicznej, Wydawnictwo ATR, Bydgoszcz 1996.

**Biblioteka Główna ATR
w Bydgoszczy**

5

24892