

UNIwersytet Technologiczno - Przyrodniczy
im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy

Wydział Mechaniczny
Katedra Inżynierii Pojazdów i Transportu

Mgr inż. Joanna WILCZARSKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

GENEZOWANIE STANU TECHNICZNEGO
W PROCESIE EKSPLOATACJI MASZYN

Biblioteka Główna UTP w Bydgoszczy



000000134531

Promotor:
dr hab. inż. Henryk Tylicki, prof. nadzw. UTP

Bydgoszcz 2008



D 329

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	3
WPROWADZENIE	5
1. ANALIZA PROCESU GENEZOWANIA STANU MASZYN	7
1.1. Ewolucja stanu maszyn	7
1.2. Rozpoznawanie stanu maszyn	16
1.3. Metody genezowania stanu technicznego maszyn	19
1.4. Metody optymalizacyjne w genezowaniu stanu maszyn	24
1.5. Wnioski	26
2. PROBLEM ROZPRAWY	28
2.1. Uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy	28
2.2. Tezy rozprawy	29
2.3. Cel główny i cele szczegółowe	29
2.4. Zakres rozprawy	30
3. MODEL GENEZOWANIA STANU MASZYN	31
3.1. Identyfikacja zbioru stanów maszyny	31
3.2. Optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych	35
3.3. Genezowanie stanu maszyny	40
3.4. Wnioski	51
4. METODYKA GENEZOWANIA STANU MASZYN	52
4.1. Algorytm genezowania stanu maszyn	52
4.2. Implementacja metodyki genezowania stanu maszyn	54
4.3. Wnioski	64
5. BADANIA WERYFIKACYJNE PROCEDUR METODYKI GENEZOWANIA STANU MASZYN	66
5.1. Badania stanowiskowe i eksploatacyjne wybranych układów maszyn	66
5.1.1. Program badań	69
5.1.2. Wyniki badań	72
5.2. Badanie procedur metodyki genezowania stanu	79
5.2.1. Charakterystyka badań	79
5.2.2. Analiza wyników badań	80
5.3. Dedykowane reguły wnioskowania w procesie genezowania stanu	108
5.4. Wnioski	110
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	112
LITERATURA	117

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a^* - punkt idealny

a_i, b_i – współczynniki wielomianu aproksymacyjnego lub interpolacyjnego

$c(y_j)$ – koszt parametrów diagnostycznych

d_{\min} - minimalna odległości „kanału błędowego” od wartości granicznej w chwili Θ_s

D_j – błąd diagnozy

e_G – błąd genezy

$F(X)$ – przestrzeń kryterialna

G - globalna funkcja odpowiedzi

h_j – wskaźnik pojemności informacyjnej parametru diagnostycznego

K - liczebność elementów szeregu czasowego w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b)

m - stopień wielomianu

n_i – liczba uszkodzeń i -tego elementu

$P(\varepsilon_i)$ - prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu ε_i

$q_{\gamma, K}$ - parametr stały wyznaczany z tablicy rozkładu Studenta dla wymaganego poziomu ufności γ i $K-2$ liczby stopni swobody

r_j - współczynnik korelacji między zmiennymi S i y_j ,

r_{jn} – współczynnik korelacji między zmiennymi y_j i y_n

$S(\Theta_n)$ – stan maszyny w chwili czasu Θ_n

S^0 – stan zdatności maszyny

S^1 – stan niezdatności maszyny

S_{dop} – dopuszczalny stan eksploatacji maszyny

$R(y)$ – niezawodność symptomowa

$U(\Theta)$ - wektor wymuszeń

U_i - udziały uszkodzeń poszczególnych elementów w ogólnej liczbie uszkodzeń elementów obiektu

w_j - standaryzowane wagi obliczeniowe

X – zbiór rozwiązań dopuszczalnych

$X(\Theta)$ - wektor cech stanu maszyny

x^0 - rozwiązanie optymalne w sensie Pareto

Y_{wy} – zbiór parametrów wyjściowych

$y_j(\Theta_1)$ – początkowa wartość parametru diagnostycznego y_j

$y_{jP}(\Theta_b + \tau_1)$ – prognozowana wartość parametru diagnostycznego y_j dla horyzontu prognozy τ_1

$y_{jG}(\Theta_b - \tau_2)$ – genezowana wartość parametru diagnostycznego y_j dla horyzontu genezy τ_2

$y_{j,d}$ – zbiór dolnych wartości granicznych parametru diagnostycznego y_j

$y_{j,g}$ – zbiór górnych wartości granicznych parametru diagnostycznego y_j

Θ - czas eksploatacji maszyny

$\Delta\Theta(y)$ – reszkowy czas życia (potencjał uszkodzenia)

Θ_d – termin kolejnego diagnozowania

γ - współczynnik kształtu

τ_1 – horyzont czasowy prognozy

τ_2 - horyzont czasowy genezy

Q_1 – prawdopodobieństwo błędu I rodzaju

Q_2 - prawdopodobieństwo błędu II rodzaju

$\zeta(\Theta)$ – proces losowy

$\mu(\Theta)$ - składnik zdeterminowany szeregu czasowego y_Θ

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

σ_G - odchylenie standardowe składnika losowego błędu genezy e_G

WPROWADZENIE

Występujące obecnie działania racjonalizujące eksploatację maszyn obejmują między innymi projektowanie efektywnych strategii eksploatacji, zaś poszukiwanie nowych ich form jest tematem wielu prac badawczych. Jednym z przejawów tej działalności jest propozycja automatyzacji systemu rozpoznawania stanu maszyn, w którym oprócz diagnozowania, które zapewnia informację o aktualnym stanie maszyny oraz prognozowania stanu, które generuje informację o terminie następnego obsługiwania maszyny konieczne jest genezowanie stanu w celu określenia przyczyny zaistnienia stanu niezdatności maszyny stwierdzonego podczas badania.

Problemy występujące w procesie genezowania stanu maszyn sprowadzają się do :

- a) analizy procesu pogarszania się stanu technicznego maszyn, określenia stanów maszyny, określenia tendencji i dynamiki zmian wartości parametrów stanu,
- b) wyboru „najlepszych” parametrów diagnostycznych opisujących ewolucję stanu maszyny;
- c) wyboru „najlepszej” metody genezowania stanu technicznego maszyny;
- d) wykorzystania informacji z genezowania stanu do określenia, stwierdzonego podczas badania, przyczyny stanu maszyny.

Użyte powyżej pojęcie „najlepsze” wiąże się z przyjęciem odpowiednich kryteriów i rozpatrzenie tych problemów w kategoriach poszukiwania rozwiązania polioptymalnego.

W aspekcie budowy nowoczesnych systemów rozpoznawania stanu maszyn istnieje wiele opracowań w różnych krajowych i zagranicznych ośrodkach badawczych mówiących szczegółowo o metodyce rozpoznawania stanu, której aplikacje pozwalają generować informacje o stanie technicznym w czasie badania maszyny oraz prognozowania jej stanu w przyszłości. Niestety w chwili obecnej nie ma użytkowych metod genezowania stanu maszyn, które można wykorzystać w praktyce (szczególnie w aspekcie opisu przebiegu i przyczyny zaistniałego stanu niezdatności maszyny), stąd celem pracy jest opracowanie metodyki genezowania stanu maszyny, której aplikacje możliwe byłyby do zastosowania w pokładowym lub stacjonarnym systemie rozpoznawania stanu maszyn. Osiągnięcie tego celu wymaga:

- a) identyfikacji problemów genezowania stanu technicznego maszyn;

- b) opracowania metodyki wyznaczenia genezy stanu maszyn, w tym sformułowania zadania optymalizacji wielokryterialnej oraz przedstawienia schematu jego rozwiązania;
- c) określenie możliwości wykorzystania opracowanej metodyki genezowania stanu technicznego maszyn w eksploatacji maszyn.

Treść pracy zawarto w pięciu rozdziałach. W pierwszym rozdziale przedstawiono problematykę genezowania stanu maszyn. Sprecyzowane w tym rozdziale wnioski pozwoliły ustalić problemy, które umożliwiły sformułować tezy, cel i zakres pracy.

W rozdziale trzecim rozpatrzono zagadnienie budowy modelu genezowania stanu maszyny, gdzie skupiono się na identyfikacji zbioru stanów maszyny, redukcji zbioru parametrów diagnostycznych opisujących ewolucję stanu maszyny w czasie eksploatacji oraz sformułowaniu procedur genezowania wartości parametrów diagnostycznych w przeszłości i szacowanie przyczyny stanu niezdatności maszyny określonego podczas badania.

W rozdziale czwartym, na podstawie opracowanego modelu, sformułowano algorytm genezowania stanu. Umożliwiło to opracowanie koncepcji implementacji metodyki genezowania stanu i programu komputerowego „Genezowanie Stanu”.

Rozdział piąty stanowi ilustrację aplikacyjną, zawartych w rozdziale trzecim i czwartym treści, w którym na przykładzie przekładni zębatej samochodowej i silników spalinowych samochodów Star11422 za pomocą opracowanego programu komputerowego, zweryfikowano opracowane procedury metodyki genezowania stanu. Wnioski z przeprowadzonych badań pozwały na sformułowanie reguł wnioskowania diagnostycznego, które w obszarze genezowania stanu maszyn mogą stanowić podstawę do automatyzacji systemu rozpoznawania stanu maszyn.

Pracę zamykają podsumowanie i wnioski, a także perspektywy dalszych badań nad genezowaniem stanu maszyn w aspekcie możliwości ich wykorzystania, w wspomaganych komputerowo, pokładowych i stacjonarnych systemach rozpoznawania stanu maszyn.

Realizacja ustaleń i propozycji zawartych w pracy powinna zwiększyć skuteczność i efektywność diagnozowania maszyn, a tym samym przyczynić się do działań racjonalizujących ich eksploatację.

1. ANALIZA PROCESU GENEZOWANIA STANU MASZYN

Zastosowanie w procesie eksploatacji optymalnych metod oceny stanu technicznego maszyn jest podstawą automatyzacji procesu rozpoznawania stanu. Wymaga to wielu przedsięwzięć, do których za jedno z ważniejszych, obok oceny stanu i prognozowania stanu, uważa się genezowanie stanu technicznego maszyn.

Problematyka genezowania stanu technicznego wymaga przeprowadzenia analizy ewolucji stanu technicznego maszyn, identyfikacji problemów rozpoznawania stanu maszyny i sposobów ich rozwiązania, oraz określenie możliwości wykorzystania metod optymalizacyjnych do rozwiązania zidentyfikowanych i sformułowanych powyżej problemów.

Przedstawione zagadnienia stanowią treść tego rozdziału, zaś sformułowane wnioski, po przeprowadzonej analizie procesu genezowania stanu maszyny, będą stanowić podstawę do dalszych rozważań przedstawionych w pracy.

1.1. Ewolucja stanu maszyny

Śledzenie zmian stanu maszyny możliwe jest dzięki znajomości podstaw fizycznych zjawisk zużyciowych, co ułatwia poznanie genezowanych parametrów stanu i parametrów diagnostycznych. Taka wiedza pozwala na racjonalne konstruowanie, wybór odpowiedniej technologii wytwarzania oraz optymalizację właściwości eksploatacyjnych maszyn.

Starzeniem fizycznym nazywa się procesy fizyczne zachodzące wskutek wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych, powodujących nieodwracalne zmiany własności użytkowych maszyn. Procesy starzenia występują z chwilą zakończenia produkcji maszyny i zależą od szeregu czynników oraz oddziaływań zewnętrznych i wewnętrznych. Do czynników zewnętrznych zaliczyć można: wpływ atmosfery, naturalnego podłoża, współpracujących maszyn itp. Do czynników wewnętrznych należą: procesy mechaniczne, mechaniczno-fizyczne i mechaniczno-chemiczne, występujące w trakcie użytkowania, obsługiwanie i przechowywania maszyny [12,21,68,117,118,147]. Przedstawione czynniki powodują uszkodzenia starzeniowe, polegające na stopniowej utracie własności fizycznych wskutek destrukcyjnego oddziaływania środowiska oraz zmian zachodzącej w maszynie. Starzenie fizyczne maszyn zależy od:

- a) czynników atmosferycznych (opady atmosferyczne i opary, ruch powietrza, zanieczyszczenia, pyły i gazy przemysłowe, aktywność chemiczna i wilgotność atmosfery, nagrzanie słoneczne i przemysłowe oraz ciśnienie barometryczne);
- b) czynników naturalnego podłoża ziemskiego lub roboczego (pole magnetyczne, przyciąganie ziemskie, gęstość, spistość podłoża, ukształtowanie warstwy wierzchniej podłoża, wilgotność i rodzaj gruntu, aktywność chemiczna podłoża, temperatura podłoża, ruch cieczy w zbiornikach wodnych).

Zużycie maszyny to trwałe niepożądane zmiany jej stanu, występujące podczas eksploatacji. Procesy zużyciowe maszyny związane są z przetwarzaniem energii w pracę mechaniczną i towarzyszącymi im siłami, którymi oddziałują na siebie elementy maszyny. W trakcie funkcjonowania maszyny w parach kinematycznych występują reakcje od przyłożonych sił, wynikające z nałożonych więzów geometrycznych i kinematycznych. W elementach par kinematycznych powstają zmienne naprężenia mechaniczne zależne od obciążenia, obrotów, jakości warstwy wierzchniej itp. Jako podstawowe rodzaje zużycia wyróżnia się [78,85,114,134,147]:

- a) zużycie ściernie (bez i z warstwą ścierną, strumieniowo ściernie i w ośrodku sypkim);
- b) zużycie adhezyjne (bez głębokiego wrywania i z głębokim wrywaniem);
- c) zużycie plastyczne (w warstwie wierzchniej i w całej masie);
- d) zużycie zmęczeniowe (normalne, pitting, spaling, fretting);
- e) zużycie korozyjne (metali i niemetali);
- f) zużycie erozyjne (hydroerozja, erozja gazowa, elektroerozja);
- g) zużycie kawitacyjne (kawitacja przepływowa, kawitacja falowa);
- h) zużycie cieplne (metali, niemetali).

Występujący w elementach maszyn rodzaj niszczenia jest zależny od wielu czynników, które można podzielić na:

- a) geometryczne (kształt, chropowatość, błędy kształtu itp.);
- b) kinematyczne (rodzaj ruchu, prędkość itp.);
- c) dynamiczne (rodzaj obciążenia, siła obciążająca, nacisk jednostkowy itp.);
- d) materiałowe (materiał warstwy wierzchniej, jakość smarowania itp.);
- e) środowiskowe (wilgotność, powinowactwo chemiczne itp.);
- f) cieplne (temperatura, odprowadzenie ciepła itp.).

Przebieg zużycia maszyn w czasie eksploatacji zależy od tego, który z procesów zużycia jest dominujący. I tak dla wszystkich zespołów maszyn, w których występuje tarcie ślizgowe, wyróżnia się zazwyczaj trzy okresy przebiegu zużycia (okres starzenia wstępnego,

okres zużycia normalnego, okres zużycia przyspieszonego). Z powodu występowania różnorodnych przyczyn uszkodzeń maszyny, intensywność występowania uszkodzeń w toku eksploatacji jest różna i można ją związać z przedstawionymi etapami eksploatacji (rys.1.1) [142].



Rys. 1.1. Charakterystyka zużycia maszyny

Okres I zużycia wstępnego (rys.1.1) jest początkowym okresem współpracy elementów maszyny, w którym następuje przekształcenie początkowego stanu warstw wierzchnich docieranych elementów w stan optymalny charakteryzujący się zwiększoną odpornością na zużycie tych elementów. W okresie zużycia wstępnego występuje znaczna intensywność uszkodzeń, powodowana ukrytymi wadami materiałowymi, błędami wytwarzania (szczególnie montażu) oraz błędami w czasie transportu i podczas przechowywania.

Okres II (rys. 1.1) charakteryzuje się stałą intensywnością zużycia, która zależy przede wszystkim od czynników eksploatacyjnych, w mniejszym stopniu zaś od czynników konstrukcyjnych i technologicznych. Okres normalnej eksploatacji charakteryzuje się obniżonym i w przybliżeniu ustabilizowanym poziomem intensywności uszkodzeń.

W III okresie (rys.1.1) następuje przyspieszone zużycie elementów maszyn, 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 może prowadzić do uszkodzenia maszyny.

Wynika stąd, że proces zużycia jest ściśle związany z czasem pracy maszyny i prowadzi do uszkodzeń, co pozwala na zastosowanie w diagnostyce modeli ewolucji parametrów zużycia. W przypadku modeli wykorzystujących przepływ i transformacji energii noszą nazwę procesorów energii i dobrze ujmują ewolucję parametrów stanu (degradacji) szerokiej klasy maszyn [21,147]. Maszyna widziana jako procesor energii ma jedno wejście zasileniowe i dwa wyjścia: mocy przetworzonej (energii, produktu) oraz mocy (energii) dyssypowanej zewnętrznie. Część energii dyssypowanej jest akumulowana wewnętrznie dając w efekcie degradację struktury wewnętrznej, a co za tym idzie degradację stanu maszyny. Miernikiem zaawansowania degradacji wewnętrznej jest ewolucja eksportowanej mocy dyssypacji (strat) V , zależnej również od składowych wektora logistycznego L . Moc dyssypacji procesów resztkowych maszyny $V(\Theta, L)$ przedstawia się w postaci:

$$V(\Theta, L) = V_o(L) \left[1 - \frac{\Theta}{\Theta_a(L)}\right]^{-1} \quad (1.1)$$

gdzie: Θ_a – czas do awarii maszyny.

Dla większości modeli symptomowych istnieje prosty związek między symptomową krzywą życia a resztkowym czasem życia $\Delta\Theta(y) = 1 - \Theta(y)$, zwanym też potencjałem uszkodzenia. Dla grupy eksploatowanych maszyn niezawodność symptomowa jest równoważna średniemu resztkowemu czasowi życia maszyny [22,114,147]:

$$R(y) = \Delta\Theta(y)_{sr} \quad (1.2)$$

Zatem przebieg krzywej symptomowej w czasie życia maszyny i odpowiadająca mu niezawodność symptomowa $R(y)$ można zapisać:

$$y(\Theta) = y(\Theta_1) \left\{ -\ln\left(1 - \frac{\Theta}{\Theta_b}\right) \right\}^{\frac{1}{\gamma}}, \quad R(y) = \exp\left(-\left(\frac{y(\Theta)}{y(\Theta_1)}\right)^\gamma\right) \quad (1.3)$$

gdzie: $y(\Theta_1)$ - jest początkową wartością symptomu (parametru diagnostycznego),

γ - współczynnik kształtu.

Wyznaczając współczynnik kształtu modelu γ za pomocą regresji liniowej uzyskuje się model ewolucji parametru stanu określający ewolucję stanu maszyny.

Uszkodzenie maszyny jest jednym z istotnych zdarzeń występujących w procesie użytkowania maszyn, determinującym ich niezawodność i efektywność wykorzystania,

proces obsługiwań technicznych, a także zakres potrzeb diagnostyki technicznej. Uszkodzenia powstają wskutek zachodzenia w maszynie powolnych, nieodwracalnych procesów starzeniowych i zużyciowych. Uszkodzenie maszyny można zdefiniować jako zdarzenie polegające na przejściu maszyny (układu, zespołu, elementu) ze stanu zdatności do stanu niezdatności. Przez stan zdatności rozumie się taki stan maszyny, w którym spełnia ona wyznaczone funkcje i zachowuje wartości parametrów, określone w dokumentacji technicznej. Natomiast przez stan niezdatności rozumie się stan maszyny, w którym nie spełnia ona chociażby jednego z wymagań, określonych w dokumentacji technicznej. Uszkodzenia w czasie eksploatacji maszyn mogą zachodzić [29,68,85,115]:

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

Główne przyczyny powstawania uszkodzeń to [68,79,85,136,142,147]:

- a) konstrukcyjne – uszkodzenia powstałe wskutek błędów projektowania i konstruowania obiektu, najczęściej przy nie uwzględnieniu obciążeń ekstremalnych, tzn. wartości, które w istotny sposób przekraczają obciążenia nominalne, prowadząc wprost do uszkodzeń;
- b) produkcyjne (technologiczne) – uszkodzenia powstałe wskutek błędów i niedokładności procesów technologicznych (brak tolerancji wymiarów, gładkości powierzchni, obróbki termicznej, itp.) lub wad materiałów elementów obiektu;
- c) eksploatacyjne – uszkodzenia powstałe w wyniku nie przestrzegania obowiązujących zasad eksploatacji lub na skutek oddziaływań czynników zewnętrznych nie przewidzianych dla warunków użytkowania maszyny, co prowadzi przedwczesnego zużycia i osiągnięcia stanu granicznego;
- d) starzeniowe – zawsze towarzyszące eksploatacji maszyn i będące rezultatem nieodwracalnych zmian, prowadzących do pogorszenia wytrzymałości i zdolności współdziałania poszczególnych elementów.

Jedną z klasyfikacji uszkodzeń jest ich podział ze względu na rodzaj strumienia uszkodzeń, są to [99]:

- a) uszkodzenia przypadkowe (losowe), zdarzenia tworzą stacjonarny strumień uszkodzeń elementów maszyny, często na stochastyczną zbieżność wielu niezależnych od siebie czynników wymuszających;
- b) uszkodzenia losowo uporządkowane, zdarzenia tworzą zmienny w czasie strumień uszkodzeń, często ze względu na istnienie określonego mechanizmu powstawania uszkodzeń;
- c) uszkodzenia zmęczeniowe, zdarzenia powstające wskutek określonego procesu powstawania uszkodzeń, polegającego na stopniowej utracie własności fizycznych elementu maszyny wskutek wielokrotnych cykli oddziaływania czynników związanych z funkcjonowaniem maszyny (np. obciążenie);
- d) uszkodzenia starzeniowe, zdarzenia powstające wskutek określonego procesu powstawania uszkodzeń, polegającego na stopniowej utracie własności fizycznych elementu maszyny wskutek oddziaływania czynników zewnętrznych otoczenia maszyny oraz zmian zachodzących w materiale jej elementu;
- e) uszkodzenia zużyciowe cierne, zdarzenia powstające wskutek oddziaływania określonego procesu powstawania uszkodzeń, któremu towarzyszy stopniowa zmiana własności warstwy elementu maszyny ze względu na siły tarcia. Proces ten przebiega z różnym natężeniem w zależności od obecności w skojarzeniach elementów maszyny zanieczyszczeń, produktów tarcia oraz rodzaju i jakości smarowania.

Wynika stąd, że w większości przypadków uszkodzenia są zdarzeniami losowymi, bowiem dla przeciętnej maszyny z rozpatrywanego zbioru maszyn nie można dokładnie przewidzieć chwili uszkodzenia (prognozowanie stanu maszyny) oraz dokładnie określić przyczynę i okoliczności zaistnienia uszkodzenia (genezowanie stanu maszyny). Można jednak, stosując odpowiednie narzędzia z zakresu rozpoznawania stanu i niezawodności maszyn [52,85,116,118], oszacować na odpowiednim poziomie ufności średni czas do uszkodzenia maszyny (rozwiązanie problemu prognozowania stanu) oraz prawdopodobnie możliwe jest oszacowanie przyczyny zaistnienia uszkodzenia (rozwiązanie problemu genezowania stanu).

Stan techniczny maszyny określony jest jako zbiór wartości parametrów stanu w chwili badania maszyny Θ_b , przy czym formułuje się dla nich pewne warunki (cechy stanu powinny być niezależne i zupełne).

Stan maszyny może być określany bezpośrednio na podstawie badań jej elementów i/lub badań współdziałania tych elementów. Wymaga to jednak demontażu maszyny oraz adaptacji elementów do badań, co często powoduje zmianę warunków ich współdziałania.

Inny wariant bezpośredniej oceny stanu maszyny polega na wykorzystaniu arbitralnych opinii specjalistów, co wiąże się z trudnościami formalizowania sposobów wyznaczania tych opinii.

Metody pośrednie oceny stanu maszyny polegają na tym, że oceny stanu wyznaczane są na podstawie obserwacji sygnałów (procesów) związanych z działaniem maszyny. Sygnałem diagnostycznym (tzn. sygnałem zależnym od stanu maszyny) jest dowolny nośnik materialny, najczęściej przebieg (cecha, miara) wielkości fizycznej, umożliwiającej przenoszenie (w przestrzeni i czasie) wiadomości o stanie maszyny. Pełny opis stanu maszyny składa się z zbioru charakterystyk (cech, parametrów, symptomów) ukazujących wszystkie poziomy i aspekty istnienia maszyny. W praktyce każdy opis stanu maszyny jest ograniczony dostępnymi wskaźnikami i jest modelem tego stanu, budowanym na podstawie przyjętych kryteriów. Globalny stan maszyny, uwzględniający jego zmianę w czasie, określany jest zależnością [147]:

$$G(X(\Theta), U(\Theta), Z(\Theta)) = Y(\Theta) \quad (1.4)$$

gdzie: $X(\Theta)$ - wektor cech stanu maszyny,

$U(\Theta)$ - wektor wymuszeń,

$Z(\Theta)$ - wektor zakłóceń,

$Y(\Theta)$ - wektor wyjściowy zawierający sygnały wykorzystywane w diagnostyce

(symptomy-sygnały diagnostyczne zorientowane uszkodzeniowo), parametry diagnostyczne,

G - globalna funkcja odpowiedzi,

Θ - czas eksploatacji maszyny.

Główną drogą rozpoznania faktu utracenia zdolności użytkowych maszyny jest model, który opisuje w sformalizowany sposób powiązania czasowe wyników obserwacji diagnostycznej maszyny i ich odniesienie do wartości kryterialnych określających diagnozowane stany maszyny. W procesie diagnozowania maszyny podstawą wnioskowania są zazwyczaj zbiory informacji generowane przez system monitorujący stan maszyny, czyli zaobserwowane historie zmian wartości nadzorowanych parametrów diagnostycznych (wektor $Y(\Theta)$). Zbiory te, dane w postaci szeregu czasowego y_Θ , są realizacją pewnego procesu losowego $\zeta(\Theta)$, którego parametry zależą od losowego wektora wymuszeń $X(\Theta)$ kształtującego poziom badanego procesu zużycia maszyny (wektor $U(\Theta)$) oraz losowego szumu zakłóceń (wektor $Z(\Theta)$) [7,8,22,147].

Skuteczność szacowania wartości parametrów diagnostycznych zarówno w przyszłości (prognozowanie) jak i w przeszłości (genezowanie), przy założeniu niepełnej i niepewnej (nieprecyzyjnie określonych lub wyznaczonych z nieokreślonym błędem) ich wartości w czasie (Θ_1, Θ_b) , jest tym większa im dłuższy jest posiadany szereg czasowy y_Θ i prostsze są mechanizmy kształtujące jego przebieg. W badaniach diagnostycznych występuje niestety często sytuacja, gdy szeregi czasowe obserwacji diagnostycznej maszyny są relatywnie krótkie w stosunku do potrzeb związanych z poprawną identyfikacją składnika systematycznego (zdeterminowanego) kształtującego trend rozpoznawanego zjawiska $\mu(\Theta)$ oraz obciążone są błędem pomiarowym. Dlatego też podstawowym zagadnieniem w analizie szeregów czasowych $\{y_\Theta\}$ jest badanie struktury ciągu zebranych wyników pomiarowych. Problem ten najczęściej jest ukierunkowany na wyróżnienie w szeregu czasowym składowych deterministycznych (regularnych) opisywanych za pomocą trendu $\mu(\Theta)$ i oddziaływań losowych $\eta(\Theta)$, np. (obciążenia, warunki terenowe, warunki klimatyczne, jakość obsługi, inne). Trend w tym ujęciu jest reprezentowany pewną nielosową funkcją trendu $\mu_p(\Theta)$ wyznaczającą generalny kierunek rozwoju i określającą ogólną prawidłowość zmian kontrolowanego zjawiska procesu zużycia maszyny, zaś składnik losowy $\eta(\Theta)$ określa wahania wokół składowej systematycznej spowodowane działającymi na maszynę różnych losowo powtarzających się wymuszeń [27,147].

W przypadku maszyn, których eksploatację należy rozpatrywać nie tylko w kontekście ich stanu (stanu realizowanego procesu lub stanu technicznego), ale także w aspekcie bezpieczeństwa realizowanych przez nie funkcji (np. statki powietrzne, statki morskie, maszyny krytyczne i inne) wygodną formułą jest traktowanie ich jako systemów antropotechnicznych (maszyna i operator maszyny) działających w pewnym otoczeniu. W przypadku statków powietrznych (SP) definicja uszkodzenia jest np. bardziej rozbudowana [55,68,136], bowiem wprowadza się dodatkowo definicję awarii jako zdarzenia, w którym zespoły lub układy SP przestały prawidłowo funkcjonować i stały się niezdolne do pracy (wg ICAO – International Civil Aviation Organisation) oraz stanu awaryjnego, jako anormalnego stanu SP w trakcie jego eksploatacji [68,136]. Rozróżnia się wówczas awarie (uszkodzenia):

- a) pojedyncze,
- b) złożone składające się z kilku niezależnych awarii pojedynczego urządzenia;
- c) złożone składające się z kilku niezależnych awarii więcej niż jednego urządzenia;
- d) nie wykrytej awarii;
- e) dalszych awarii, które należy spodziewać się w następstwie awarii istniejącej.

Ponadto przyjmując formułę SP, jako systemu antropotechnicznego w pewnym otoczeniu, definiuje się i wyróżnia takie pojęcia jak: błąd, wypadek lotniczy, wypadek naziemny, wypadek nadzwyczajny i wydarzenie lotnicze.

Wynika stąd że złożoność interpretacyjna stanów niezdatności maszyny (w tym przypadku SP) wymusza nie tylko konieczność analizy różnorodnych stanów niezdatności, ale także podjęcie trudu analizy systemowej przyczyny zaistnienia tych stanów w kontekście systemu antropotechnicznego działającego w otoczeniu, np. poprzez działania lub ich brak, uchybienia operatora, warunki lub czynniki które doprowadziły do stanu niezdatności (w przypadku SP: personalne, techniczne, systemowe i środowiskowe). Spełnieniem powyższego postulatu jest np. sformułowanie zakresu określenia przyczyny stanu niezdatności maszyny. W tym celu, wykorzystując klasyfikację przyczynowo – miejscowo – skutkową stanów awaryjnych SP [136], można określić że poszukiwanymi przyczynami stanów niezdatności maszyny, występującymi pojedynczo lub w grupie, są:

- a) błąd fabryczny (błąd popełniony przez producenta maszyn w zakresie technologii lub materiału, błąd popełniony przez dystrybutora maszyny w zakresie technologii transportu do użytkownika);
- b) błąd obsługi technicznej maszyny;
- c) nieprawidłowe użytkowanie maszyny przez operatora;
- d) oddziaływanie czynników zewnętrznych na maszynę.

Przyjęcie powyższego zbioru przyczyn generuje pytanie odnośnie możliwości ich szacowania w zakresie określenia przyczyny stanów niezdatności maszyny, zarówno w aspekcie odpowiednich procedur i towarzyszącym im narzędzi. Analizując najnowsze osiągnięcia diagnostyki technicznej [22,27,29,52,85,116,118] można stwierdzić, że możliwość taką stwarza system rozpoznawania stanu maszyn.

Reasumując przedstawione powyżej rozważania związane z problematyką ewolucji stanu technicznego maszyny można stwierdzić, że:

1. Uszkodzenia maszyny są zdarzeniami losowymi, co determinuje że opisujące zmianę stanu technicznego maszyny elementy zbioru kontrolowanych wartości parametrów diagnostycznych $Y(\Theta)$, ze względu na nieokreśloność czynników procesu zużycia, są realizacjami procesu losowego.
2. Wartości parametrów diagnostycznych $Y(\Theta)$ uzyskiwane w postaci szeregów czasowych $\{y_{\Theta},\}$ są realizacjami procesu losowego, który można opisać za pomocą trendu $\mu(\Theta)$ i składnika losowego $\eta(\Theta)$. Trend w tym ujęciu jest reprezentowany pewną szacowaną nielosową funkcją

trendu $\mu_p(\Theta)$ określającą ogólną prawidłowość zmian kontrolowanego zjawiska procesu zużycia maszyny, zaś składnik losowy $\eta(\Theta)$ określa wahania wokół składowej systematycznej spowodowane działającymi na maszynę różnych losowo powtarzających się wymuszeń.

3. Ewolucja stanu technicznego maszyn jest możliwa do śledzenia za pomocą symptomowych modeli diagnostycznych i diagnostyczno – niezawodnościowych, a w połączeniu ze statystycznym przetwarzaniem wyników badań pozwala na ocenę obecnego i przyszłego stanu maszyny, a może i przeszłego stanu maszyny.

4. W większości przypadków intensywność zużywania, podobnie jak częstotliwość występowania uszkodzenia maszyny to wynik nieracjonalnej eksploatacji. Brak należytych zabiegów obsługiwanie, przechowywania oraz niewłaściwe użytkowanie może spowodować bardziej intensywne zużywanie maszyny, stąd zastosowanie w procesie eksploatacji optymalnych metod oceny rozpoznawania stanu technicznego maszyn jest jedną z możliwości przeciwdziałających procesom destrukcji stanu maszyn.

1.2. Rozpoznawanie stanu maszyny

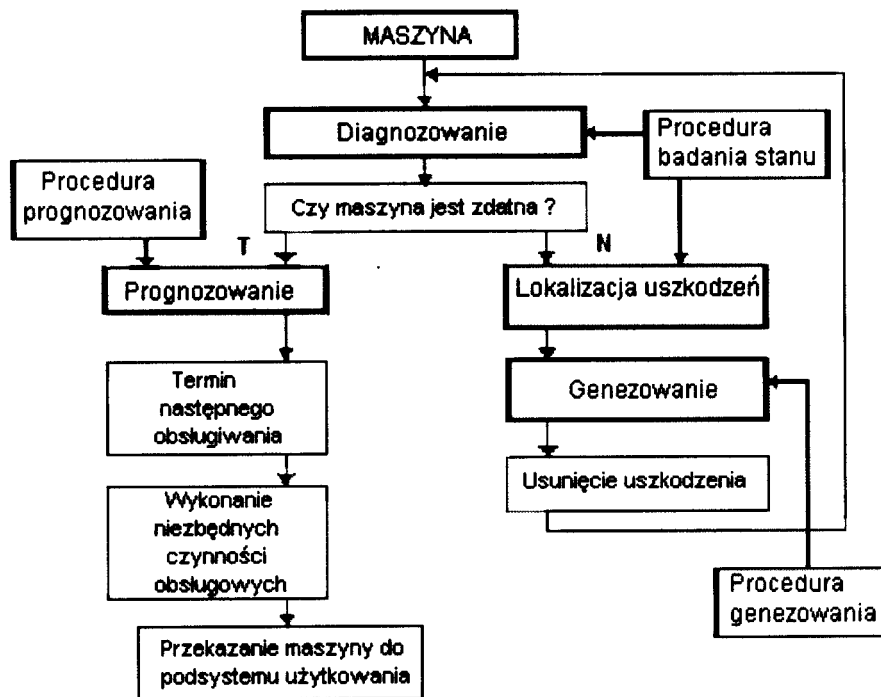
W metodologii procesu rozpoznawania stanu maszyny wyróżnia się następujące fazy badania ocenowego, które występują w następujących formach działania diagnostycznego (rys.1.1) [97,101,118,121,125,126,130,147]:

- a) diagnozowanie - jako proces określania stanu maszyny w chwili Θ_b ;
- b) prognozowanie - jako proces określania przyszłych stanów maszyny, umożliwiających np. określenie terminu następnego obsługiwanie maszyny Θ_d .
- c) genezowanie - jako proces odtwarzania historii stanów maszyny, np. w celu szacowania stanu maszyny w przeszłości;

co następnie umożliwia:

- a) określenie stanu technicznego maszyny w czasie bieżącym na podstawie wyników badań diagnostycznych. Umożliwia ono kontrolę stanu i lokalizację uszkodzeń w przypadku stanu niezdatności maszyny.
- b) przewidywanie stanu maszyny w czasie przyszłym na podstawie niepełnej historii wyników badań diagnostycznych. Umożliwia ono oszacowanie czasu niezawodnego użytkowania maszyny lub wartości wykonanej przez nią w przyszłości pracy.

- c) określenie stanu maszyny w czasie przeszłym na podstawie niepełnej historii wyników badań diagnostycznych, co umożliwi oszacowanie stanu maszyny w przeszłości.



Rys.1.1. Schemat realizacji rozpoznawania stanu maszyn w systemie obsługiwan

Stan maszyny $S(\Theta_n)$ w chwili czasu Θ_n można scharakteryzować za pomocą zbioru wartości parametrów diagnostycznych $\{y_j(\Theta); j=1, \dots, m\}$. Maszyna w chwili Θ_b (zadanie diagnozowania stanu maszyny) znajduje się w stanie zdalności S^0 , gdy spełniony jest warunek [121,123,124,125]:

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

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

Analogicznie można sformułować warunek zdalności w chwili $\Theta_{n+\tau}$ (zadanie prognozowania stanu maszyny) [7,27,59,112,119,137,147]:

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

przy czym elementy zbioru $\{y_j(\Theta_{b+\tau})\}$ 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_1 nazywa się także wyprzedzeniem lub „horyzontem czasowym prognozy”).

W ujęciu tym ocenę czasu przejścia maszyny w stan niezdatności wyznaczają wyniki prognoz parametrów diagnostycznych $\{y_j(\Theta_{b+\tau_1})\}$, sygnalizujące przekroczenie wartości granicznych.

Podobnie można sformułować warunek zdatności w chwili $\Theta_{b-\tau_2}$ (zadanie genezowania stanu maszyny) [70,123,127]:

$$S(\Theta_{b-\tau_2}) = S^0 \Leftrightarrow \forall (j=1, \dots, m) \quad [\{y_{j,d}\} \leq \{y_j(\Theta_{b-\tau_2})\} \leq \{y_{j,g}\}], \quad (1.7)$$

przy czym niektóre wartości elementów zbioru $\{y_j(\Theta_{b-\tau_2})\}$ mogą być nieznane i stąd konieczność ich przewidywania w założonym przedziale czasu τ_2 . Wielkość τ_2 oznacza przedział czasu, dla którego realizowany jest proces genezowania (wielkość τ_2 nazywa się „horyzontem czasowym genezy”). W ujęciu tym oszacowanie stanu maszyny lub wartości wykonanej przez nią w przeszłości pracy wyznaczają wyniki genezowania wartości parametrów diagnostycznych $\{y_j(\Theta_{b-\tau_2})\}$.

Główne zadania, które można sformułować przy rozwiązywaniu problematyki rozpoznawania stanu maszyn to [89,97,115,123]:

- a) sformułowanie celu diagnozowania, prognozowania i genezowania stanu maszyny;
- b) zmiana stanu maszyny w czasie eksploatacji;
- c) opis stanu maszyny za pomocą cech stanu oraz zależność pomiędzy cechami stanu i parametrami diagnostycznymi;
- d) rozwiązanie zadania diagnozowania stanu;
- e) rozwiązanie zadania prognozowania stanu;
- f) rozwiązanie zadania genezowania stanu.

Głównymi problemami pojawiającymi się przy rozwiązaniu tak ujętych zadań jest [122,125]:

- a) wybór „najlepszych” parametrów diagnostycznych opisujących aktualny stan i ich zmiana w czasie eksploatacji maszyny;
- b) wyznaczenie testu diagnostycznego;
- c) wyznaczenie wartości prognozowanej parametru diagnostycznego dla horyzontu prognozy τ_1 , $s_{jp}(\Theta_{b+\tau_1})$ za pomocą „najlepszej” metody prognozowania i wyznaczenie terminu kolejnego diagnozowania Θ_d ;
- d) wyznaczenie wartości genezowanej parametru diagnostycznego dla horyzontu genezy τ_2 , $y_{jG}(\Theta_{b-\tau_2})$ za pomocą „najlepszej” metody genezowania i oszacowanie stanu

maszyny, wartości wykonanej przez nią w przeszłości pracy lub określenie przyczyny wystąpienia zlokalizowanego, podczas badania maszyny, uszkodzenia .

Użyte powyżej pojęcie „najlepsze” wiąże się z przyjęciem odpowiednich kryteriów i rozpatrzenie tych problemów w kategoriach poszukiwania rozwiązania optymalnego, zaś ze względu na wiele kryteriów oceny wymaga rozpatrzenie tych problemów w kategoriach rozwiązania polioptymalnego, np. dla poszczególnych zadań (optimum lokalne) lub dla zadania rozpoznawania stanu maszyny (kryterium globalne).

1.3. Metody genezowania stanu technicznego maszyny

Doskonalenie eksploatacji maszyn, oprócz diagnozowania oraz prognozowania, wymaga także wyznaczenia genezy stanu maszyny, od którego najczęściej żąda się określenie przyczyny zaistniałego niepożądanego zdarzenia eksploatacyjnego (uszkodzenie, awaria, katastrofa) starając się odpowiedzieć na dwa pytania:

- a) jak to się stało ? – opis przebiegu zdarzenia i warunki jego zaistnienia;
- b) dlaczego tak się stało ? – opis przyczyny zaistniałego zdarzenia.

W celu udzielenia odpowiedzi na powyższe pytania, jak zaznaczono w pracy [70], istnieją dwa podejście:

- a) eksploratywne, polegające na gromadzeniu wiedzy w obszarze związanym z eksploatacją maszyny, na podstawie której możliwa jest analiza przyczynowa – skutkowa niepożądanych zdarzeń eksploatacyjnych;
- b) normatywne, polegające na zidentyfikowaniu zadań z przeszłości i wskaźników ich opisujących te zadania.

W obu przypadkach wielkościami opisującymi zaistnienie niepożądanych zdarzeń eksploatacyjnych mogą być odpowiednio dobrane zbiory parametrów diagnostycznych, co dobrze koresponduje z poczynioną zależnością (1.7) odnośnie warunku zdatności w chwili Θ_{b-t2} (zadanie genezowania stanu maszyny). Problemy występujące wówczas w procesie genezowania stanu maszyny sprowadzają się do :

- a) analizy procesu pogarszania się jej stanu technicznego, określenie tendencji i dynamiki zmian wartości jej cech stanu, wybór stanów w których mogła znajdować się maszyna, dekompozycja maszyny na układy i zespoły, kryteria wyboru stanów i prawdopodobieństwo ich występowania, wybór „najlepszych” parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu maszyny;
- b) wyboru „najlepszej” metody wyznaczania genezy stanu;

c) wykorzystanie informacji o genezie stanu do szacowania stanu maszyny w przeszłości.

Na podstawie analizy opracowań dotyczących rozwiązywania problemów zbliżonych do prezentowanych w pracach [12,23,29,70,127] stwierdza się, że:

1. W celu poprawnego funkcjonowania nowoczesnych systemów obsługiwanie maszyn (wykorzystujących informację o stanie maszyny w chwili badania, w czasie przyszłym i w czasie przeszłym) istnieje potrzeba opracowania metody, która w przypadku niepełnej lub niepewnej historii zmian stanu maszyny umożliwi szacowanie stanu maszyny w czasie przeszłym eksploatacji (prognoza wsteczna, genezowanie stanu maszyny).
2. Metody genezowania nie znalazły dotychczas zastosowania w postaci algorytmów obliczeniowych do szacowania stanu maszyny w czasie przeszłym jej eksploatacji.
3. Brak opracowań, wykorzystujących narzędzia optymalizacji wielokryterialnej, mających na celu rozwiązanie problemu genezowania stanu technicznego maszyny według algorytmu: aktualny stan techniczny maszyny – parametry diagnostyczne opisujące ten stan - metoda genezowania wykorzystująca niepełną lub niepewną historię wartości parametrów diagnostycznych w czasie przeszłym – geneza stanu technicznego maszyny – wykorzystanie genezy stanu technicznego maszyny w systemie obsługiwanie.
4. Projektowane i wprowadzane obecnie w krajach Unii Europejskiej przepisy ISO dotyczące wymagań, jakie mają spełniać maszyny, np. dla pojazdów, obok ograniczeń związanych z toksycznością spalin i zużyciem paliwa, narzucają również wymagania dotyczące diagnostyki poszczególnych układów pojazdu, w tym szczególnie układów silnika i układów bezpieczeństwa jazdy [28,29]. Przewiduje się tu pokładowe systemy diagnostyczne, które rozpoznają, zapamiętują, sygnalizują, prognozują i genezują stany zespołów i układów pojazdu (np. w pokładowym systemie diagnostycznym EOBD – opcja „zamrożonej ramki”).
5. Stwierdza się ponadto, że proste algorytmy prognostyczne zaczynają stanowić element standardowego oprogramowania przyrządów diagnostycznych zaś proste procedury wyznaczania genezy stanu stanowią podstawę oprogramowania systemów doradczych [26,27,28,29], np. przy analizie wypadków drogowych (pakiet CRASCH i inne) lub genezowaniu zdarzeń eksploatacyjnych statków powietrznych (SP), gdzie systemy pokładowe danego SP (typu fly-by-wire lub fly-by-light) oprócz informacji przekazywanych do pilota (załogi) informują naziemne centra informatyczne o aktualnym położeniu i stanie technicznym SP oraz jednocześnie uaktualniają dane eksploatacyjne i wypadkowe [136].

Biorąc pod uwagę powyższe ustalenia oraz wnioski z analizy problemów ewolucji stanu maszyny można stwierdzić, że genezowanie stanu technicznego maszyn powinno polegać na:

- a) określeniu (przy niepełnych lub niepewnych danych wartości parametrów diagnostycznych) trendu zmian wartości parametrów diagnostycznych, charakteryzującego proces pogarszania się stanu maszyny w przeszłości;
- b) przyrównaniu chwilowych wartości parametrów diagnostycznych do wartości granicznych;
- c) szacowanie zapasu przebiegu niezawodnej pracy zespołów i układów maszyny w interesującym użytkownika czasie przeszłym eksploatacji maszyny lub przeprowadzenia analizy przyczyny zlokalizowanego w chwili badania stanu niezdatności maszyny.

Rozwiązanie przedstawionych postulatów wymaga rozpatrzenia problematyki wyznaczenia wartości genezowanej parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu technicznego maszyny w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) oraz określenie sposobu wyznaczenia genezy stanu technicznego maszyny.

Podjmując rozważania na temat genezowania stanu maszyn nie można wykazać wyższości pewnych metod umożliwiających genezowanie wartości parametrów diagnostycznych oraz szacowania stanu technicznego maszyny $S(\Theta_1, \Theta_b)$. Można jednak zastosować kryteria dotyczące wymagań związanych z [55,70,127,130]:

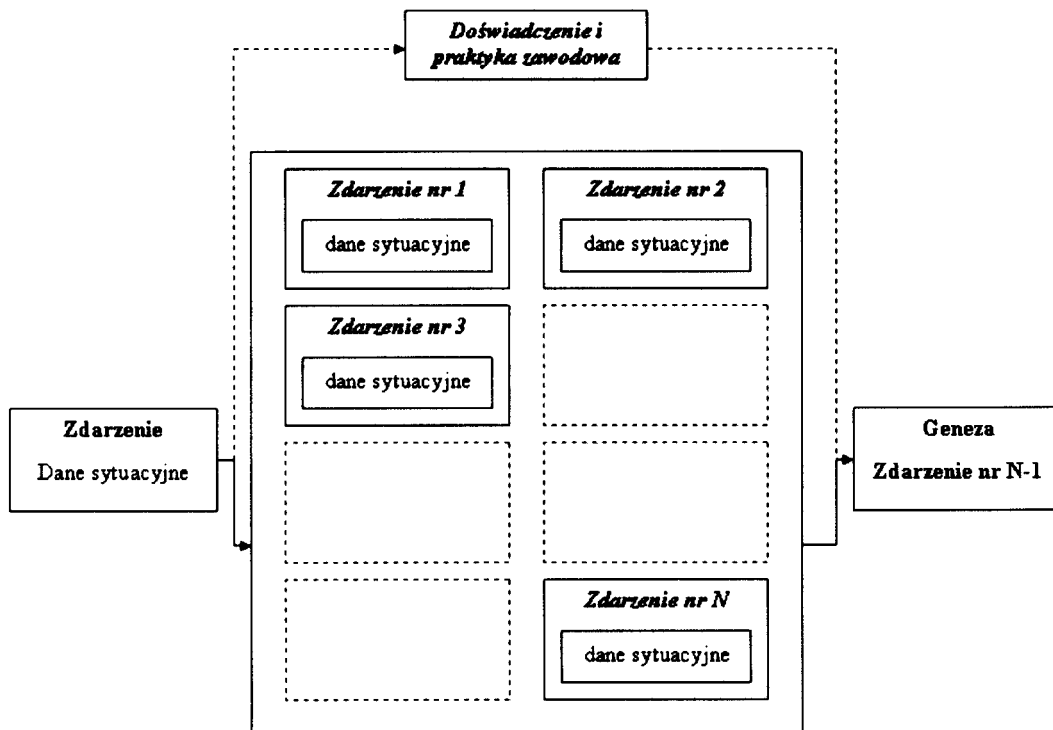
- a) postacią genezy (wartość genezowana parametru diagnostycznego, szacowany stan maszyny w przeszłości, wartość wykonanej przez nią w przeszłości pracy, przyczyna stanu niezdatności maszyny lub inna postać genezy stanu maszyny);
- b) wpływem zmiany warunków eksploatacji maszyn i czynności obsługowych na właściwości eksploatacyjne maszyny, które należy uwzględnić przy wyborze metody genezowania;
- c) możliwych do wykorzystania metod genezowania (np. metody jakościowe, metody analityczne lub ich odpowiednia kompilacja).

Wśród niewielkiej liczby metod, umożliwiających genezowanie stanu maszyn, można wyróżnić dwie grupy [52,55,70,85,118,147]:

- a) metody jakościowe (genezowanie sytuacyjne na podstawie informacji zebranych z otoczenia i metody eksperckie na podstawie relacji świadków zdarzenia);
- b) analityczne (metody symptomowe na podstawie wartości parametrów diagnostycznych z przedziału czasu (Θ_1, Θ_b)).

Genezowanie sytuacyjne

W przypadku genezowania sytuacyjnego przyczynę wystąpienia niezdatności określa się na podstawie oględzin przeprowadzonych bezpośrednio po zaistnieniu zdarzenia. Zebrane w ten sposób informacje (dane sytuacyjne) służą do porównania z danymi sytuacyjnymi powstałymi w wyniku zamodelowania pewnych uszkodzeń (rys.1.2).



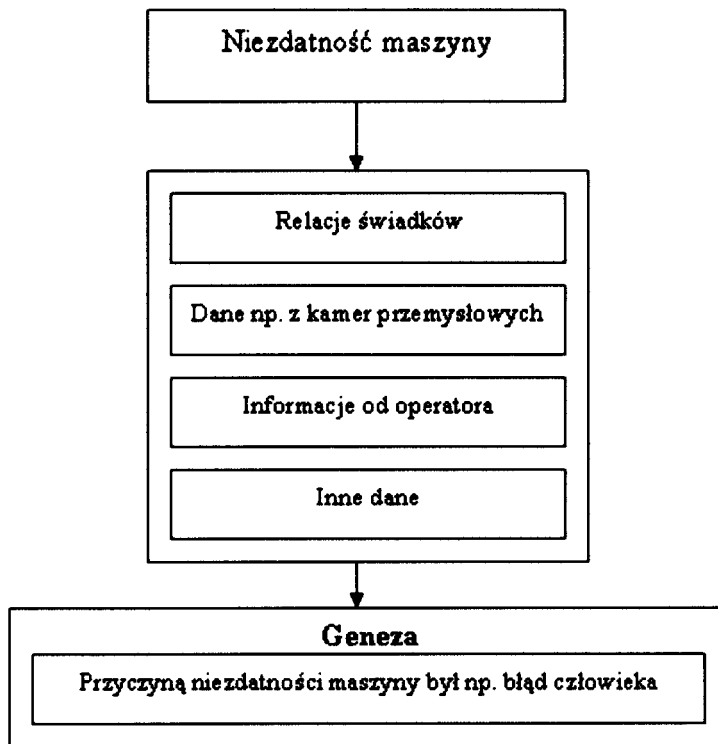
Rys.1.2. Schemat genezowania sytuacyjnego

Szuka się wówczas danych odpowiadających danym sytuacyjnym zdarzenia wejściowego. Podczas modelowania danego zdarzenia znana jest przyczyna, która doprowadza do niezdatności maszyny i w momencie uszkodzenia gromadzi się powstałe w ten sposób dane sytuacyjne tworząc ich bazę odpowiadającą pewnym, niekiedy typowym uszkodzeniom. Procedurę tę można wykorzystać przy ustalaniu przyczyn zaistniałej niezdatności maszyny poprzez porównanie zebranych informacji z danymi sytuacyjnymi odpowiadającymi konkretnym zdarzeniom (przy wykorzystaniu także wiedzy użytkownika maszyny), co umożliwia do określenia prawdopodobnej przyczyny wystąpienia uszkodzenia lub jak przyjęto w przypadku statków powietrznych, awarii [70,127].

Genezowanie eksperckie

Metoda polega na określeniu przyczyn zaistniałego stanu maszyny na podstawie relacji świadków danego zdarzenia (rys.1.3). Na przykład w przypadku wypadku samochodowego na podstawie relacji świadków można określić przyczynę powstania

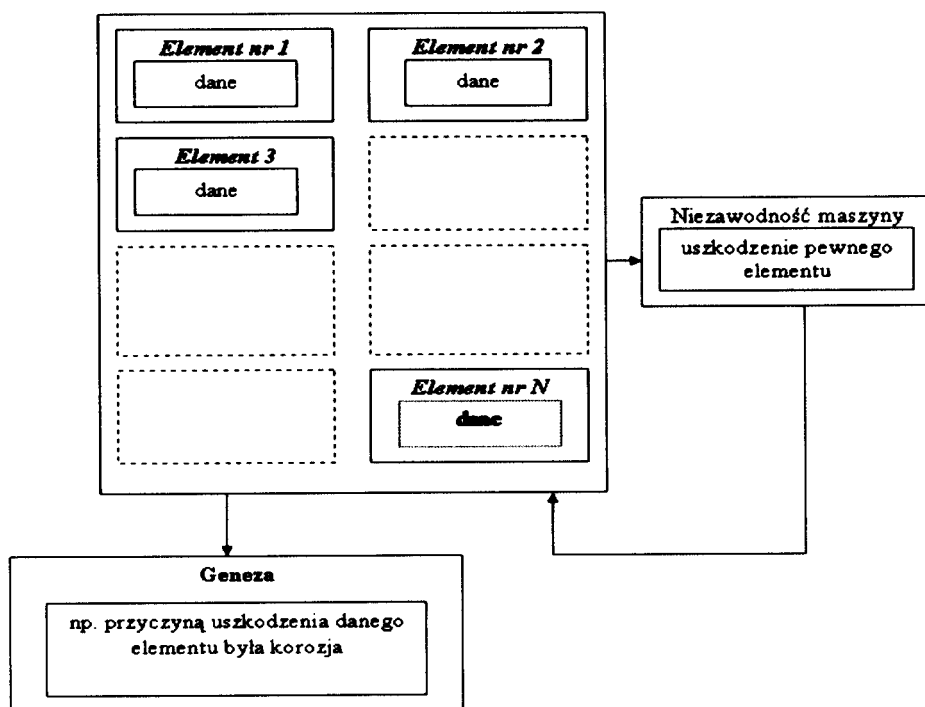
wypadku [78]. Innym przypadkiem mogą być tu również informacje przekazane przez osobę obsługującą daną maszynę, która może dostarczyć bardzo cennych danych o zachowaniu się maszyny przed uszkodzeniem. W przemyśle bardzo często wykorzystuje się kamery przemysłowe mogące pomóc w określeniu przyczyny powstałej niezdatności.



Rys.1.3. Schemat genezowania eksperckiego

Genezowanie symptomowe

Zakładając możliwość rejestracji wartości parametrów diagnostycznych w czasie (Θ_1, Θ_b) oraz stanów maszyny w czasie eksploatacji (np. w trakcie eksperymentu bierno – czynnego) uzyskuje się bazę informacji w postaci macierzy informacji: wartości parametrów diagnostycznych – stany maszyny – czas eksploatacji [55,89,125]. W chwili utraty przez maszynę stanu zdadności S^0 prawdopodobnie będzie możliwość stwierdzenia, na podstawie zebranych danych jak i oględzin maszyny, jaka mogła być przyczyna oraz warunki powstania stanu niezdatności maszyny (rys.1.4).



Rys.1.4. Schemat genezowania na podstawie rejestrowanych wartości parametrów diagnostycznych

Przedstawione powyżej metody genezowania stanu maszyn oraz ich odpowiednia synergia powinny pozwolić na opracowanie procedur, których realizacja powinna umożliwić genezowanie stanu maszyny.

1.4. Metody optymalizacyjne w genezowaniu maszyn

Optymalizacja procesu genezowania stanu maszyn, w związku z poczynionymi powyżej ustaleniami, powinna polegać na wyborze „najlepszych” rozwiązań według odpowiednich kryteriów, dla każdego etapów procesu genezowania stanu. W związku z powyższym możliwe jest rozpatrzenie tak sformułowanych zadań optymalizacyjnych według jednego wybranego kryterium lub wielu kryteriów [2,122,128].

W optymalizacji jednokryterialnej cała informacja potrzebna do wyznaczenia rozwiązania powinna być zebrana przed rozpoczęciem obliczeń, natomiast proces decyzyjny ma często naturę iteracyjną i wieloetapową, podczas którego prowadzone są badania mające wpływ na rozwiązanie. Często w trakcie takich badań istnieje potrzeba dodania nowego kryterium. Niekiedy nie można z dostateczną wiarygodnością uwzględnić wszystkich znaczących czynników, bądź optymalizacja prowadzi do naruszenia ograniczeń trudnych do sformalizowania bądź zamodelowania, stąd bardziej przydatny staje aparat formalny optymalizacji wielokryterialnej, który odzwierciedla skomplikowane problemy decyzyjne.

Optymalizacja wielokryterialna jest najbardziej rzeczywistą oraz najbardziej naturalną koncepcją podejmowania decyzji, stąd wydaje się konieczne zastosowanie jej narzędzi także w przypadku optymalizacji procesu genezowania powinna, w której można wyróżnić [122,128]:

- a) wyznaczenie zbioru rozwiązań dopuszczalnych X , którego elementami są przedstawione etapy genezowania, co wymaga sformułowania schematu konstruowania schematu genezy stanu;
- b) określenie funkcji kryterialnej F , której elementy są egzemplifikacją wymagań jakościowych i strukturalnych wynikających z właściwości procesu eksploatacji maszyny (charakter zużycia zespołów, czynniki eksploatacyjne, czynniki konstrukcyjno-jakościowe, charakter wymuszeń zewnętrznych, postulaty wynikające ze sformułowanego celu genezowania);
- c) rozwiązanie zadania optymalizacji wielokryterialnej i określeniu „najlepszego” zbioru parametrów diagnostycznych i „najlepszej” metody genezowania;
- d) badanie jakości rozwiązania optymalnego poprzez określenie wrażliwości uzyskanych procedur na niektóre czynniki wynikające z własności procesu eksploatacji maszyny (które nie zostały uwzględnione jako elementy funkcji kryterialnej F);
- e) walidacja metodyki wyznaczania optymalnej genezy stanu w aspekcie możliwości jej wykorzystania dla maszyn;
- f) opracowanie koncepcji wykorzystania optymalnej genezy stanu w eksploatacji maszyn.

W celu rozwiązania powyższych problemów, na podstawie przeprowadzonej analizy [2,122,128] , uważa się, że najbardziej odpowiednią metodą optymalizacji wielokryterialnej do budowy optymalnej procedury genezowania jest metoda optymalizacji w sensie Pareto. W metodzie tej element $x^0 \in X$ nazywa się rozwiązaniem optymalnym w sensie Pareto wtedy i tylko wtedy, gdy w X nie istnieje taki element x^* , że $F_n(x^*) > F(x^0)$ dla każdego $n \in \mathbb{N}$ oraz istnieje $k \in \mathbb{N}$, że :

$$F_1(x^*) > F_k(x^0) \quad (1.24)$$

Praktyczne zastosowanie rozwiązania optymalnego x^0 determinują postulaty:

- a) rozwiązanie x^0 powinno być jedyne;

b) 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 :

1. Wyboru punktu idealnego $a^* \in R^N$, który będzie uważany za najbardziej pożądany wynik, definiowany w przypadku zadania optymalizacji (X, F, \geq) jako:

$$a_n^* = \sup F_n(x); n \in N, x \in X \quad (1.25)$$

2. 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:

$$F_n^*(x) = (F_n(x))(a^* - a_n^{\min}), n \in N \quad (1.26)$$

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

$$0 < (a_n^* - F_n(x))(a^* - a_n^{\min}) < 1; x \in X, n \in N \quad (1.27)$$

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 środku w a^* ze zbiorem A).

Przedstawiony algorytm optymalizacji procesu genezowania stanu maszyny zawiera poszczególne etapy, będące odpowiednio elementami formułowania i rozwiązania zadania optymalizacyjnego, przy czym zgodnie z przedstawionymi w podrozdziale 1.3 ustaleniami należy rozwiązać zadanie optymalizacyjne zbioru parametrów diagnostycznych maszyny oraz zadanie optymalizacyjne wyboru metod genezowania stanu maszyny.

1.5. Wnioski

Reasumując rozpatrzone w tym rozdziale zagadnienia dotyczące problematyki procesu genezowania stanu maszyn można stwierdzić, że:

1. W celu poprawnego funkcjonowania nowoczesnych systemów obsługiwanie maszyn (wykorzystujących informację o stanie maszyny w chwili badania, w czasie przyszłym i w czasie przeszłym) istnieje potrzeba opracowania metodyki, która w przypadku niepełnej lub niepewnej historii wartości parametrów diagnostycznych maszyny umożliwi szacowanie stanu maszyny w czasie przeszłym eksploatacji (genezowanie stanu maszyny).
2. W chwili obecnej nie ma użytecznych metod genezowania stanu maszyn, które można wykorzystać w praktyce (szczególnie w aspekcie opisu przebiegu i przyczyny zaistniałego stanu niezdatności maszyny), stąd rozpatrzono możliwość wykorzystania genezowania sytuacyjnego, genezowania eksperckiego i genezowania symptomowego.
3. Za najbardziej przydatną metodę przyjęto genezowanie symptomowe, wykorzystujące rejestrowane w trakcie eksploatacji maszyny zmienne wartości parametrów diagnostycznych.
4. W celu optymalizacji procesu genezowania stanu proponuje się wykorzystać narzędzia optymalizacji wielokryterialnej w zakresie:
 - a) wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych;
 - b) optymalnej metody genezowania stanu maszyny do wyznaczenia wartości genezowanej parametru diagnostycznego;
 - c) szacowania stanu maszyny w przeszłości.

Reasumując zawarte w rozdziale rozważania stwierdza się, że istnieje potrzeba oraz istnieje możliwość opracowania procedur genezowania stanu maszyny. Wynika to z przeprowadzonej analizy procesu rozpoznawania stanu maszyn oraz wyróżnienia metody genezowania symptomowego jako najbardziej odpowiedniej do szacowania stanu maszyny w przeszłości. Ponadto możliwość wykorzystania narzędzi optymalizacji wielokryterialnej w obszarze wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych i w obszarze wyznaczenia optymalnej metody genezowania wartości parametru diagnostycznego w przeszłości powinna umożliwić opracowanie procedur metodyki genezowania stanu maszyny, możliwej do wykorzystania, w wspomaganym komputerowo, systemie rozpoznawania stanu maszyn.

2. PROBLEM ROZPRAWY

2.1. Uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy

Nowoczesne maszyny są coraz bardziej złożone konstrukcyjnie i funkcjonalnie, a w konsekwencji trudniejsze do utrzymania w stanie zdatności, bezpieczeństwa i komfortu użytkowania. Nowe generacje maszyn, np. pojazdów i maszyn roboczych, są wyposażone w urządzenia elektroniczne, głównie diagnostykę pokładową, specjalizowane komputery pokładowe, czujniki elektroniczne i monitory kontrolne. Stwarza to szereg nowych wyzwań w obszarze utrzymania ich w stanie zdatności i bezpieczeństwa.

W wielu opracowaniach krajowych i zagranicznych ośrodkach badawczych przedstawia się nowoczesne systemy rozpoznawania stanu maszyn, których analiza pozwala generować informacje o stanie technicznym jak i o stanie procesów zachodzących w zespołach i układach maszyn. Przykładem są liczne opracowania w kraju (np. system DIADYN, system AMandD, system RSTM – System Rozpoznania Stanu Maszyn) i na świecie (HUMS – Health and Usagy Monitoring System, Diagnostic System Metro of Medellin) [10,16,30,33, 44,52,63,69,101,124,150].

Ponadto projektowane i wprowadzane obecnie w krajach Unii Europejskiej przepisy ISO dotyczące wymagań, jakie mają spełniać maszyny, gdzie przewiduje się pokładowe systemy diagnostyczne, które rozpoznają, zapamiętują, sygnalizują, prognozują i genezują stany zespołów i układów maszyn. Stwierdza się także, że proste procedury wyznaczania genezy stanu stanowią podstawę oprogramowania systemów doradczych, np. przy analizie wypadków drogowych (pakiet CRASCH i inne), w pokładowym systemie sterująco – diagnostycznym EOBD silników spalinowych samochodów lub w systemach pokładowych statków powietrznych typu fly-by-wire i fly-by-light [69,82,85,98,136].

Dlatego też doskonalenie eksploatacji maszyn, oprócz diagnozowania które zapewnia informację o aktualnym stanie technicznym oraz prognozowania, które przy założeniu monotoniczności zmian wartości parametrów diagnostycznych w czasie eksploatacji umożliwia wyznaczenie terminu i zakresu obsługiwaną, wymaga także wyznaczenia genezy stanu technicznego maszyny. Możliwymi do zastosowania narzędziami w opracowaniu procedur genezowania stanu technicznego maszyn są metody i środki nowoczesnej diagnostyki technicznej, co w tej pracy powinno znaleźć szczególne zastosowanie. Dotyczy to zarówno implementacji wielu teoretycznie istniejących światowych propozycji (często tylko literaturowych), metod i procedur diagnostycznych, jak i opracowanie nowych metod,

szczególnie w obszarze szacowania wartości parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu technicznego maszyny w czasie jej eksploatacji oraz genezowania stanu technicznego maszyny.

2.2. Tezy rozprawy

Przedstawione uzasadnienie potrzeby realizacji rozprawy pozwala sformułować tezy główne rozprawy, które można określić następująco:

1. **Umiejętność szacowania wartości parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu w czasie eksploatacji maszyny stanowi podstawę do budowy procedur genezowania stanu technicznego.**
2. **Opracowane procedury metodyki genezowania stanu maszyny umożliwiają określenie przyczyny, wyznaczonego w czasie badania, stanu niezdatności maszyny.**

Takie sformalizowanie problemu badawczego wyraźnie wskazuje na zakres przewidzianych rozważań oraz badań eksperymentalnych tej rozprawy, co szczegółowo zawarto w celu głównym, celach szczegółowych i w zakresie pracy.

2.3. Cel główny i cele szczegółowe

Zaproponowane tezy główne wskazują cel główny rozprawy, który można przedstawić w następującej postaci:

Opracować i zweryfikować praktycznie metodykę genezowania stanu maszyny, wykorzystując do tego szacowanie wartości parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu technicznego maszyny w czasie jej eksploatacji oraz opracowane procedury genezowania stanu maszyny.

Dla osiągnięcia powyższego celu niezbędna jest realizacja następujących zagadnień:

1. Analiza problemów procesu genezowania stanu maszyn związanych z ewolucją stanu maszyny oraz możliwych do wykorzystania metod genezowania i metod optymalizacyjnych.
2. Opracowanie modelu genezowania stanu maszyny.

3. Opracowanie procedur metodyki genezowania stanu maszyn i ich implementacja.
4. Przeprowadzenie egzemplifikacji metodyki procesu genezowania stanu maszyn dla wybranych układów maszyn.
5. Określenie możliwości wykorzystania opracowanej metodyki genezowania stanu technicznego maszyn w eksploatacji maszyn.

2.4. Zakres rozprawy

Przedstawione opracowanie jest próbą opracowania metodyki genezowania stanu technicznego maszyn przy wykorzystaniu nowoczesnej technologii prowadzenia badań naukowych. Dotyczy to zarówno najnowszej wiedzy i dokonań z obszaru teorii i zastosowań praktycznych obszaru nauki tematu rozprawy, nowoczesnej aparatury badawczej szczególnie do pozyskiwania i przetwarzania danych, nowoczesnych technologii informatycznych głównie w zakresie wspomaganie realizacji eksperymentów i w zakresie opracowania statystycznego wyników badań.

Ważnym elementem rozważań rozprawy będzie opracowanie modelu genezowania stanu technicznego maszyny przy wykorzystaniu narzędzi optymalizacji wielokryterialnej w obszarze redukcji informacji diagnostycznej oraz metod szacowania wartości parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu maszyny w czasie eksploatacji.

Zrealizowana rozprawa składa się z dwóch części: części teoretycznej i części badawczej.

Głównym celem części teoretycznej jest przegląd stanu wiedzy i adaptacja wybranych jej fragmentów związanych z szacowaniem wartości parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu technicznego maszyny i zastosowaniem metod optymalizacji wielokryterialnej do opracowania modelu genezowania stanu maszyny oraz budowy procedur metodyki. Omówione tu będą adaptowane na potrzeby rozważań tej pracy oraz opracowane autorskie procedury szczegółowych metod badawczych.

W części empirycznej rozprawy przedstawione zostaną wyniki badań metodyki genezowania stanu maszyn dla wybranych układów maszyn. Stanowiąc to powinno podstawę do określenia możliwości wykorzystania procedur metodyki genezowania stanu w eksploatacji maszyn, np. w pokładowym lub stacjonarnym systemie rozpoznawania stanu, co na obecnym etapie rozwoju metod diagnostycznych stanowi oryginalne rozwiązanie w zakresie nowoczesnych strategii eksploatacji maszyn.

3. MODEL GENEZOWANIA STANU MASZINY

W rozdziale tym, po sformułowaniu założeń identyfikacji zbioru stanów maszyny, określono procedury redukcji zbioru parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu maszyny w czasie eksploatacji. Pozwoliło to na sformułowanie założeń do określenia modelu genezy stanu technicznego maszyny, którego elementami jest genezowanie wartości parametrów diagnostycznych w przeszłości oraz szacowanie przyczyny stanu niezdatności maszyny określonego podczas oceny stanu.

3.1. Identyfikacja zbioru stanów maszyny

Liczba stanów, w których może znajdować się maszyna wynika z jej struktury konstrukcyjno – funkcjonalnej. Dla niezdekomponowanej maszyny można wyróżnić stany:

- a) maszyna zdatna;
- b) maszyna niezdatna;
- c) maszyna zdatna zadaniowo.

Wyróżniony stan „maszyna zdatna zadaniowo” odnosi się do sytuacji, gdy w maszynie można wyróżnić niesprawności pomniejszające jej ogólny stan techniczny przy zachowaniu wymaganej jakości realizowanych procesów roboczych. W przypadku tym, zgodnie z teorią diagnostyki technicznej maszyna jest niezdatna, chociaż może z powodzeniem realizować przypisane jej funkcje. Stan techniczny maszyny powinien być ujmowany nierozłącznie z zachodzącymi w niej procesami roboczymi. Jakość procesów roboczych zachodzących w maszynie jest bowiem funkcją jej stanu technicznego. W praktyce eksploatacyjnej do określenia stanu technicznego maszyny nie jest konieczne ani też możliwe wyróżnienie zbyt dużej liczby jej stanów. Uzasadnione jest bowiem założenie o bardzo małym prawdopodobieństwie uszkodzenia jednocześnie więcej niż jednego elementu. Zatem przy założeniu pojedynczego uszkodzenia liczba stanów niezdatności równa jest liczbie K elementów maszyny [12,29,78,118,147].

Przy powyższym założeniu maszyna może być w jednym stanie zdatności i K stanach niezdatności. Jeżeli przyjmie się dwuwartościową oceną stanu (zdatny, niezdatny), maszyna może być w jednym stanie zdatności S^0 (gdy zdatne są elementy) i S^1 stanach niezdatności:

$$S^1 = 2^K - 1 \quad (3.1)$$

Przy założeniu trójwartościowej oceny stanów, liczbę stanów niezdatności maszyny ustala zależność:

$$S^1 = 3^K - 1 \quad (3.2)$$

Liczba zdefiniowanych elementów maszyny jest uzależniona od stopnia jej dekompozycji. Wynika z tego, iż pod pojęciem elementu należy rozumieć element maszyny o ściśle zdefiniowanym przeznaczeniu i opisujących go parametrach struktury. W konstrukcji maszyny na określonym poziomie dekompozycji wyróżnione elementy nie mogą występować w liczbie większej niż 1, co oznacza że każdy element w procesie wyróżniania elementu uszkodzonego w danym poziomie dekompozycji może być wyróżniany tylko jeden raz. W ujęciu takim elementem może być np. cewka zapłonowa układu zapłonowego silnika spalinowego w samochodzie, jak i też niemożliwe do dalszego podziału np. koło zębate przekładni zębatej, łożysko toczne lub układ scalony wzmacniacza operacyjnego. Taka interpretacja pojęcia „element” koresponduje z funkcjonującym w technice postrzeganiem [12,96,122,130,142,147], iż element stanowi obiekt, w którego opisie dokonanym z punktu widzenia określonego badania, nie zakłada się podziału tego elementu na części. Jeżeli przy powyższym uwzględnia się stan zdadności, liczba stanów maszyny będzie sumą liczby elementów i jednego stanu zdadności S^0 :

$$S = S^1 + 1 \quad (3.3)$$

a minimalny zbiór wszystkich stanów określa zależność:

$$S = \{s_z, s_1, \dots, s_i, \dots, s_k\} \quad (3.4)$$

gdzie: $s_1, \dots, s_i, \dots, s_k$ – stany, w których jest jednocześnie uszkodzenie jednego elementu.

Przyjmując przedstawione założenia i uwzględniając potrzeby procesu genezowania stanu maszyny można sformułować konkluzję, że liczba stanów maszyny [51,55] zależy od:

- a) ilości elementów maszyny przy określonym poziomie jej dekompozycji;
- b) kryteriów oceny stanów elementów;
- c) eliminacji stanów mało istotnych w procesie diagnozowania maszyny.

Ustalenie zatem stanów maszyny można odnosić do tych elementów, które wyróżnione powinny być w procesie genezowania stanu. Czynnikiem wyróżniającymi elementy, przy różnych stopniach złożoności maszyny, są:

- a) charakter uszkodzeń elementów;
- b) częstotliwość występowania uszkodzeń;
- c) wpływ uszkodzeń na zdadność maszyny;
- d) wpływ uszkodzeń na jakość procesów roboczych realizowanych przez maszynę;

e) wpływ uszkodzeń na możliwości realizacji zadań maszyny.

Przyjmując założenie, że stan techniczny maszyny zależy od stanu jej elementów określenie stanu technicznego możliwe będzie wtedy, gdy będą znane funkcje realizowane przez te elementy oraz relacje między nimi. Każda grupa elementów, na podstawie której tworzone zostaną zbiory stanów i odpowiadające im zbiory parametrów wyjściowych, powinna charakteryzować się następującymi własnościami [12,85,118,122]:

- a) każdy wyróżniony element posiada tylko jeden sygnał wyjściowy i dowolną liczbę sygnałów wejściowych;
- b) dla każdego elementu znane są wartości graniczne jego sygnałów wejściowych i wyjściowych a także określona jest ich zależność funkcjonalna jak również sposób ich kontroli;
- c) element jest zdalny, gdy przy wartościach wszystkich jego sygnałów wejściowych nie równych odpowiadającym im wartościom granicznym, wartość sygnału wyjściowego nie jest też równa wartości granicznej;
- d) równość wartości przynajmniej jednego sygnału wejściowego z jego wartością graniczną prowadzi do równości wartości sygnału wyjściowego z jego wartością graniczną, co oznacza że element jest niezdalny.

Sprecyzowane powyżej założenia implikują konieczność dokładnej znajomości struktury maszyny i rzutują na sposób definiowania elementów zbioru procedur wyboru stanów maszyny. Przedstawione rozważania umożliwiają określenie stanów maszyny poprzez wybór odpowiednich elementów z różnych poziomów jej dekompozycji. Klasyfikacja wszystkich elementów nie jest potrzebna ani też możliwa. Określenie, które elementy należy wybrać, jest możliwe tylko wówczas, gdy zdefiniuje się i określi kryteria wyboru stanów.

Analiza problemu wyboru zbioru stanów maszyny, wynikająca z analizy literaturowej [85,118,142,147] jak i z wyników badań własnych [122,123] dotyczących uszkodzalności maszyn wskazuje, że racjonalnym byłoby przyjęcie jednej z metod:

- a) słabych ogniw;
- b) prawdopodobieństwa uszkodzenia elementów.

Metoda słabych ogniw polega na zastosowaniu kryterium słabych ogniw ds_1 , wyróżniającego elementy ze względu na trwałość maszyny, jej naprawialność oraz koszt usunięcia uszkodzenia. Metodzie tej odpowiada procedura wyboru elementów według kryterium słabych ogniw. Metodę słabych ogniw stosuje się według następującej zasady.

Niech $u_i; i = \overline{1, N}$ oznaczają udziały uszkodzeń poszczególnych elementów w ogólnej liczbie uszkodzeń elementów obiektu, czyli:

$$u_1 = \frac{n_1}{N}; u_2 = \frac{n_2}{N}; \dots; u_i = \frac{n_i}{N}; \dots; u_N = \frac{n_N}{N}; \quad (3.5)$$

gdzie: n_i – liczba uszkodzeń i -tego elementu.

Podzbiory u_i porządkuje się w szereg nierosnący, w którym pierwszy wyraz odnosi się do elementu o największym udziale uszkodzeń w ogólnej liczbie uszkodzeń obiektu i oznacza się przez u_1 , a następnie wartości spełniają relację:

$$u_1 > u_2 > \dots > u_i > \dots > u_N \quad (3.6)$$

W szeregu mogą wystąpić także wyrazy o tej samej wartości, wówczas stosuje się kryterium dodatkowe, np. ceny jednostkowej, czyli wyrazem poprzedzającym w szeregu będzie element, którego cena jednostkowa jest większa.

Metoda prawdopodobieństwa uszkodzenia polega na zastosowaniu kryterium prawdopodobieństwa uszkodzenia elementów. W metodzie tej wyróżnia się elementy ze względu na prawdopodobieństwo ich uszkodzenia przyjmując pewną wartość prawdopodobieństwa uszkodzeń, powyżej których się je wyróżnia, np. $P(\varepsilon) > 0,7$.

Procedurę wyboru elementów według prawdopodobieństwa uszkodzenia stosuje się według zasady: niech $P(\varepsilon_i) i = \overline{1, N}$ oznaczają prawdopodobieństwa uszkodzenia elementu. Jako elementy wybrane traktuje się te elementy maszyny, które spełniają relację:

$$\bigwedge_{\varepsilon_i \in E} P(\varepsilon_i) > P(\varepsilon) \quad (3.7)$$

gdzie $P(\varepsilon)$ może przyjmować wartości, w zależności od ustalenia, z przedziału:

$$0,5 < P(\varepsilon) < 1 \quad (3.8)$$

Reasumując powyższe rozważania związane z metodami określenia zbioru stanów maszyn uważa się, że najbardziej przydatną może być metoda prawdopodobieństwa uszkodzenia elementów maszyny, ponieważ jest najmniej wymagająca w aspekcie kłopotliwego, a niekiedy niemożliwego w realizacji dla maszyn, eksperymentu czynnego.

3.2. Optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych

Zbiór parametrów diagnostycznych wyróżnia się ze zbioru parametrów wyjściowych. Na podstawie wyników badań i ustaleń poczynionych w pracach [112,114,121,123], mających na celu potwierdzenie niektórych propozycji zawartych w pracach dotyczących redukcji informacji diagnostycznej [19,21,27,78,109], uważa się że wyznaczanie zbioru parametrów diagnostycznych w procesie genezowania stanu maszyn powinno uwzględniać:

- a) zdolność odwzorowania zmian stanu maszyny w czasie eksploatacji;
- b) ilość informacji o stanie maszyny;
- c) odpowiednią zmienność wartości parametrów diagnostycznych w czasie eksploatacji maszyny.

Parametry diagnostyczne $y_j \in Y$ są wielkościami zmiennymi w czasie $Y=Y(\Theta)$, bowiem zależą od przebiegu procesów wymuszających starzenie i zużycie. Zostało ustalone [8,12,19,27,120,147], że parametry diagnostyczne mogą odzwierciedlać stan maszyn i zależą od zmian stanu maszyny S i czasu eksploatacji maszyny Θ :

$$Y = Y(S, \Theta) \quad (3.9)$$

stąd określenie ich umożliwia rozpoznanie stanu technicznego maszyny.

Zbiór parametrów diagnostycznych Y wyróżnia się ze zbioru parametrów wyjściowych Y_{wy} , które opisują przebieg procesów wyjściowych (procesy robocze i towarzyszące), zależnych od stanu technicznego obiektu :

$$Y_{wy} = Y_{wy}(S, \Theta) \quad (3.10)$$

Wzajemny związek stanu maszyny S i parametrów wyjściowych Y_{wy} pozwala, przy spełnianiu warunków dotyczących jednoznaczności, szerokości pola zmian, dostępności i mierzalności, parametry wyjściowe Y_{wy} wstępnie traktować jako parametry diagnostyczne oraz określić punkty pomiarowe w maszynie. Spełnienie tych warunków wyróżnia wstępnie ze zbioru Y_{wy} zbiór parametrów diagnostycznych Y .

W celu dokładniejszego wyróżnienia zbiorów $Y \subset Y_{wy}$ stosuje się najczęściej kryterium minimalnego błędu diagnozy. Wyróżnia się tu parametry, które charakteryzują się

minimalnym błędem diagnozy oraz procedurę wyboru parametrów diagnostycznych wg minimalnego błędu diagnozy.

Istotą tej metody jest określenie błędu diagnozy D , tzn. obszaru „przykrycia” funkcji gęstości prawdopodobieństw warunkowych parametru $y_j \in Y$ określonego przez Serdakowa [12,120] zależnością :

$$D = P\left(\frac{S_1}{y_j}\right) \cdot Q_1 + P\left(\frac{S_2}{y_j}\right) \cdot Q_2 \quad (3.12)$$

zaś prawdopodobieństwo błędu I rodzaju Q_1 polegające na zaliczeniu maszyny będącej w stanie zdadności $S^0=S_1$ do stanu niezdatności $S^1=S_2$:

$$Q_1 = \int_{y_{gr}}^{+\infty} f\left(\frac{y_j}{S_1}\right) dy_j \quad (3.13)$$

oraz prawdopodobieństwo błędu II rodzaju Q_2 polegające na zaliczeniu maszyny będącej w stanie niezdatności $S^1=S_2$ do stanu zdadności $S^0=S_1$:

$$Q_2 = \int_{-\infty}^{y_{gr}} f\left(\frac{y_j}{S_2}\right) dy_j \quad (3.14)$$

Następnie wybór „najlepszego” parametru $y^* \in Y$ poprzez minimalizację błędu diagnozy:

$$y^* = \min_j (D_j) \quad (3.15)$$

Wybór parametrów diagnostycznych według przedstawionej metody sprowadza się wówczas do :

1. Analizy jakościowej parametrów, polegającej na :

- a) badaniu istotności zmian wartości parametrów diagnostycznych przy zmianie stanu technicznego maszyny;
- b) wyznaczaniu i szacowaniu wartości granicznych y_{gr} według kryterium najmniejszego ryzyka Bayesa przy założeniu wartości kosztów błędów I i II rodzaju.

2. Analizy ilościowej, która polega na wyborze parametrów pod kątem kryteriów związanych zdolność odwzorowania zmian stanu maszyny w czasie eksploatacji, ilości informacji o stanie maszyny oraz zmienności wartości parametrów diagnostycznych w czasie eksploatacji

maszyny. Odpowiednie algorytmy uwzględniające te postulaty zostały przedstawione poniżej jako metody.

Metoda maksymalnej względnej zmiany parametru diagnostycznego

W metodzie tej wybiera się ten parametr diagnostyczny, który posiada największą wartość wskaźnika k_j . Uwzględnia on średnią prędkość zmiany parametrów w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) . Określa się go według zależności:

$$k_j = \frac{b_j}{\sum_{j=1}^m b_j},$$

$$b_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{|y_j(\Theta_{i+1}) - y_j(\Theta_i)|}{(\Theta_{i+1} - \Theta_i) |y_j(\Theta_1) - y_{j,g}|} \quad (3.16)$$

gdzie: K - liczebność elementów szeregu czasowego w przedziale (Θ_1, Θ_b) .

Metoda korelacji wartości parametrów diagnostycznych ze stanem maszyny

Metoda polega na badaniu korelacji wartości parametrów diagnostycznych ze stanem maszyny $r_j = r(W, y_j)$ (ewentualnie z czasem eksploatacji, $(r_j = r((\Theta), y_j))$):

$$r_j = \frac{\sum_{k=1}^K (\Theta_k - \bar{\Theta})(y_{j,k} - \bar{y}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (\Theta_k - \bar{\Theta})^2 \sum_{k=1}^K (y_{j,k} - \bar{y}_j)^2}} \quad (3.17)$$

$$\bar{\Theta} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \Theta_k, \quad \bar{y}_j = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_{j,k} \quad (3.18)$$

gdzie: $r_j = r(S, y_j)$; $j = 1, \dots, m$ - współczynnik korelacji między zmiennymi S i y_j ,

$r_{jn} = r(y_j, y_n)$; $j, n = 1, \dots, m$; $j \neq n$ - współczynnik korelacji między zmiennymi y_j i y_n .

W przypadku braku danych ze zbioru S zastępowane są one, przy założeniu że wyznaczenie procedur rozpoznawania stanu maszyny jest realizowane w przedziale zużycia normalnego, czasem eksploatacji maszyny. Wówczas $r_j = r(\Theta, y_j)$; $j=1, \dots, m$; $k=1, \dots, K$ (r_j -

współczynnik korelacji między zmiennymi $\Theta_k \in (\Theta_a, \Theta_b)$ (Θ_k – czas eksploatacji maszyny) i y_j).

Metoda maksymalnej pojemności informacyjnej parametru diagnostycznego

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

Zależność tę przedstawia się w postaci wskaźnika pojemności informacyjnej parametru diagnostycznego h_j , który jest modyfikacją wskaźnika odnoszącego się do zbioru zmiennych objaśniających model ekonometryczny:

$$h_j = \frac{r_j^2}{1 + \sum_{j,n=1, j \neq n}^m |r_{j,n}|} \quad (3.19)$$

$$r_{j,n} = \frac{\sum_{k=1}^K (y_{j,k} - \bar{y}_j)(y_{n,k} - \bar{y}_n)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (y_{j,k} - \bar{y}_j)^2 \sum_{k=1}^K (y_{n,k} - \bar{y}_n)^2}} \quad (3.20)$$

$$\bar{y}_j = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_{j,k} ; \quad \bar{y}_n = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_{n,k} \quad (3.21)$$

gdzie: $r_j = r(S, y_j)$; $j = 1, \dots, m$ - współczynnik korelacji między zmiennymi S i y_j ,

$r_{j,n} = r(y_j, y_n)$; $j, n = 1, \dots, m$; $j \neq n$ – współczynnik korelacji między zmiennymi y_j i y_n .

W przypadku braku danych ze zbioru S zastępowane są one, przy założeniu że wyznaczenie procedur rozpoznawania stanu maszyny jest realizowane w przedziale zużycia normalnego, czasem eksploatacji maszyny.

Zaletą przedstawionych powyżej metod jest to, że pozwalają wybrać ze zbioru parametrów wyjściowych jednoelementowe, jak i wieloelementowe zbiory parametrów diagnostycznych. Zbiór jednoelementowy odnosi się do przypadku, gdy maszyna jest zdekomponowana 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 powyżej rozważania, sformułowane w postaci algorytmu wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych zawiera następujące etapy:

1. Akwizycja danych:

- a) zbiór wartości parametrów diagnostycznych w funkcji czasu eksploatacji maszyny $\{y_j(\Theta_k)\}$, uzyskanych w czasie realizacji eksperymentu bierno – czynnego, gdzie $\Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)$;
- b) zbiór wartości parametrów diagnostycznych: $\{y_j(\Theta_1)\}$ – wartości nominalne, $\{y_{jg}\}$ - wartości graniczne, $j=1, \dots, m$;
- c) zbiór stanów maszyny $\{\Theta_k: \{s_i\}, k=1, \dots, K; i=1, \dots, I\}$ określonych w czasie realizacji eksperymentu bierno – czynnego, gdzie $\Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)$;
- d) koszt parametrów diagnostycznych $c(y_j) = \text{const}$.

2. Optymalizacja zbioru wartości parametrów diagnostycznych (tylko w przypadku dużej liczebności zbioru Y, np. $m > 10$). Zbiór parametrów diagnostycznych wyznacza się za pomocą:

- a) metody korelacji wartości parametrów diagnostycznych ze stanem maszyny (z czasem eksploatacji, $r_j = r(S, y_j)$, ($r_j = r((\Theta, y_j))$) (3.17, 3.18);
- b) metody ilości informacji parametrów diagnostycznych o stanie maszyny h_j (3.19, 3.20, 3.21).

W celu wyboru zbioru parametrów diagnostycznych wykorzystuje się wartości wag [55,85,87,112,120,121,148]:

- a) standaryzowane wagi obliczeniowe w_{1j} :

$$w_{1j} = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (3.22)$$

$$w_j = \frac{1}{d_j}, \quad d_j = \sqrt{(1 - r_j^*)^2 + (1 - h_j^*)^2} \quad (3.23)$$

$$r_j^* = \frac{r_j}{\max r_j}, \quad h_j^* = \frac{h_j}{\max h_j} \quad (3.24)$$

- b) jako kryterium wyboru parametru diagnostycznego (parametrów diagnostycznych) przyjęto $\max(w_{1j})$ i wybór parametrów diagnostycznych według tego kryterium.

3.3. Genezowanie stanu maszyny

Na podstawie wniosków i ustaleń poczynionych w trakcie analizy procesu genezowania stanu maszyn (rozdział 1) można stwierdzić, że genezowanie stanu technicznego maszyny powinno polegać na:

- a) określeniu (przy niepełnych lub niepewnych danych wartości parametrów diagnostycznych) trendu zmian wartości parametrów diagnostycznych, charakteryzującego proces pogarszania się stanu maszyny w przeszłości;
- b) przyrównaniu chwilowych wartości parametrów diagnostycznych do wartości granicznych;
- c) szacowaniu stanu technicznego maszyny w interesującym użytkownika czasie przeszłym eksploatacji maszyny, np. w celu określenia przyczyny zlokalizowanego w chwili badania uszkodzenia maszyny.

Rozwiązanie przedstawionego postulatu można przedstawić w postaci następującego algorytmu :

1. Niech zjawisko pogarszania się stanu technicznego maszyny będzie reprezentowane szeregiem czasowym $y_{\Theta} = \langle y_1, y_2, \dots, y_b \rangle$, to jest zbiorem dyskretnych obserwacji $\{y_{\Theta} = \zeta(\Theta); \Theta = \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_b\}$ pewnego procesu losowego $\zeta(\Theta)$.
2. Przy założeniu, że mechanizm zmian wartości procesu losowego w czasie $\Theta \in (\Theta_1, \Theta_b)$ kształtuje trend $\mu(\Theta)$ zakłócony różnymi oddziaływaniami losowymi $\eta(\Theta)$:

$$y_{\Theta} = \mu(\Theta) + \eta(\Theta) \quad (3.25)$$

gdzie: $\mu(\Theta)$ - charakteryzuje zdeterminowany składnik szeregu czasowego y_{Θ} i opisuje

tendencję rozwojową obserwowanego parametru diagnostycznego $y(\Theta)$,

$\eta(\Theta)$ - charakteryzuje odchylenia od trendu i wyraża działanie czynników

przypadkowych (obciążenie, warunki terenowe, warunki klimatyczne, jakość obsługi, inne)

konstruuje się takie oszacowanie $\{\mu_G(\Theta)\}$ dla nieznannej postaci trendu $\mu(\Theta)$, które zapewniłoby odpowiednią dokładność genezy $y_G(\Theta)$ dla czasu pracy maszyny Θ_G , gdzie $\Theta_G = \Theta_b - \tau_2$.

3. Oszacowanie $\mu_G(\Theta)$ wyznacza wówczas wartości obserwowanych parametrów diagnostycznych w chwili Θ_G , a tym samym możliwość genezowania stanu technicznego

maszyny $S(\Theta_G)$ na podstawie badania dopuszczalnego stanu eksploatacji maszyny S_{dop} w chwili Θ_G ;

4. Dopuszczalny stan techniczny maszyny S_{dop} w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) wyznaczany jest przez wartość czasu, dla którego poszczególne genozy $\{y_{j,G}\}$ określone na podzbiorze $\Omega^y \in \Omega$ dostępnych realizacji obserwowanych parametrów $\{y_j(\Theta)\}$ i odpowiadające im promienie przedziału błędu genezowania $\{r_{j,G}\}$ według przyjętej metody genezowania nie przekraczają wartości granicznych $\{y_{j,g}\}$

$$r_G = q_{\gamma,K} \cdot \sigma_G \quad (3.26)$$

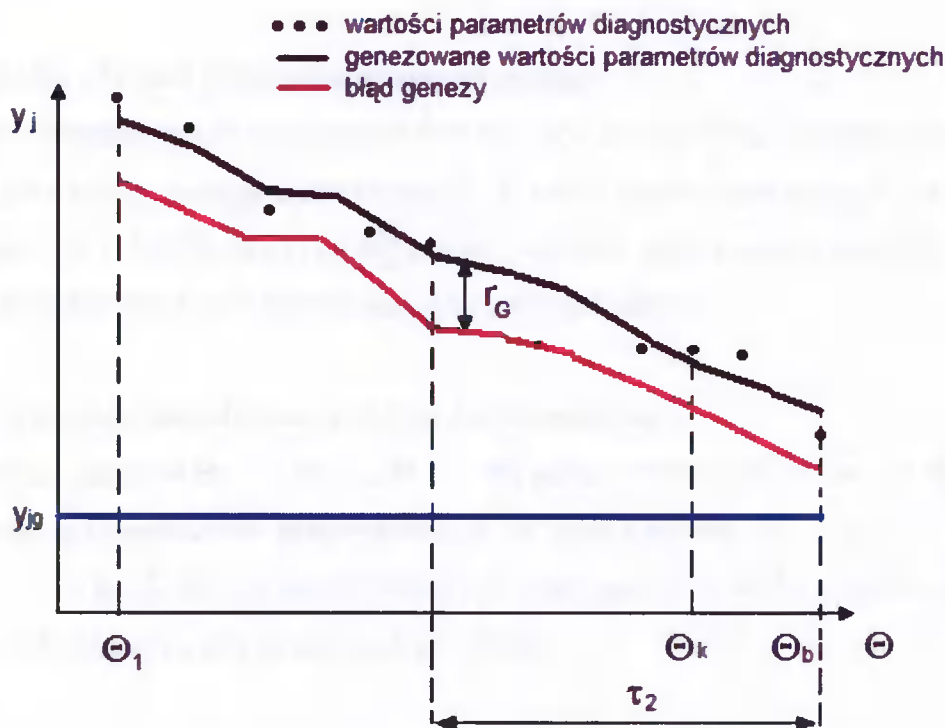
gdzie: $q_{\gamma,K}$ - parametr stały wyznaczany z tablicy rozkładu Studenta do wymaganego poziomu ufności γ i $K-2$ liczby stopni swobody,

σ_G - odchylenie standardowe składnika losowego błędu genozy e_G ;

5. W przypadku systemu obsługiwanego maszyny wymaganą postacią genozy stanu maszyny jest informacja, czy w czasie (Θ_1, Θ_b) stan techniczny był stanem dopuszczalnym S_{dop} , co umożliwia szacowanie stanu maszyny w przeszłości i ewentualne określenie przyczyny stanu niezdatności stwierdzonego w chwili badania maszyny Θ_b .

Przedział czasu (Θ_1, Θ_b) będzie wówczas okresem estymacji wartości oczekiwanej błędu genozy e_G i promienia granicy błędu genozy $r_{\sigma G}$, zaś okres czasu $\Theta_b - \tau_2$ będzie okresem aktywnej genozy stanu, tzn. wyznaczenia:

- a) wartości genezowanej parametru diagnostycznego dla czasu horyzontu genozy τ_2 , $y_{j,G}(\Theta_b - \tau_2)$;
- b) określenie wartości promienia przedziału błędu genozy $r_G(\Theta_b - \tau_2)$;
- c) wyznaczenie ewentualnych czasów $\{\Theta_{Gi}\}$ przejścia zespołu lub układu maszyny w stan niezdatności;
- d) wnioskowanie o przyczynie i okolicznościach ewentualnego stanu niezdatności stwierdzonego podczas realizacji testu lokalizacji uszkodzeń maszyny $s_i(T_{LU})$.



Rys.3.1. Schemat wyznaczania genezy wartości parametru diagnostycznego

Reasumując przedstawione powyżej problemy występujące w procesie genezowania stanu technicznego maszyny można stwierdzić, że w celu ich rozwiązania należy:

- wyznaczyć wartości genezowane parametru diagnostycznego;
- określić wartości błędu genezy;
- określić relację pomiędzy zmianami wartości genezowanej parametru diagnostycznego z błędem genezy i wartością graniczną parametru diagnostycznego;
- wykorzystać genezę stanu technicznego do analizy przyczyny zaistnienia stanu niezdatności maszyny w chwili jej badania Θ_b .

Realizacja przedstawionego powyżej algorytmu możliwa jest przy wykorzystaniu odpowiednich metod wyznaczenia genezowanej wartości parametrów diagnostycznych (przy założeniu niepełnej i niepewnej historii ich wartości w czasie (Θ_1, Θ_b)). Problem ten można rozwiązać stosując odpowiednio, jak stwierdzono na podstawie przeprowadzonych badań literaturowych i badań wstępnych [14,11,22,27,118,121], metody aproksymacji lub interpolacji.

Aproksymacja wartości parametru diagnostycznego

Aproksymacja jest to przybliżanie funkcji $Y(\Theta)$ zwanej funkcją aproksymowaną inną funkcją $Y_a(\Theta)$ zwaną funkcją aproksymującą. Z wielu metod aproksymacji, na podstawie badań wstępnych [116,118,121,122,123] zostały wybrane: aproksymacja średniokwadratowa punktowa wielomianowa oraz aproksymacja trygonometryczna.

Aproksymacja średniokwadratowa punktowa wielomianowa

Dane są punkty czasowe $\Theta_1, \dots, \Theta_i, \dots, \Theta_j, \dots, \Theta_b$ parami różne czyli dla $i \neq j \Leftrightarrow \Theta_i \neq \Theta_j$ oraz dane są wartości parametrów diagnostycznych w tych punktach $y_1, \dots, y_i, \dots, y_b$, gdzie $y=f(\Theta_i)$, $i=1, \dots, b$. Zadaniem aproksymacji jest więc znaleźć wartości współczynników a_0, a_1, \dots, a_m wielomianu $Y_m(\Theta)$ stopnia m -tego postaci:

$$Y_a = Y_m(\Theta) = \sum_{j=0}^m a_j \Theta^j, \quad (3.28)$$

aby błąd średniokwadratowy był najmniejszy czyli:

$$e_G = \min_{a_0, a_1, \dots, a_m} B = \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=0}^m a_j \Theta_i^j)^2 \quad (3.29)$$

Zadanie aproksymacji średniokwadratowej punktowej sprowadza się więc do rozwiązania $m+1$ równań o $m+1$ niewiadomych.

Aproksymacja trygonometryczna

Aproksymacja trygonometryczna jest stosowana wówczas, gdy funkcja aproksymowana jest funkcją okresową a punkty szeregu czasowego $Y = \{y_i(\Theta)\}$ pochodzące z obserwacji zmiany wartości parametru diagnostycznego są równoodległe. Funkcja aproksymująca przyjmuje wówczas postać:

$$Y_a = Y(\Theta) = a_0 + \sum_{i=1}^m (a_i \cdot \cos \frac{2\pi \cdot i}{n} \Theta + b_i \cdot \sin \frac{2\pi \cdot i}{n} \Theta) \quad (3.30)$$

gdzie: n - liczba punktów szeregu czasowego,

m - stopień wielomianu trygonometrycznego, przy czym parametr m musi spełniać

warunek: $n > 2m + 1$.

Zagadnienie aproksymacji sprowadza się wówczas do obliczenia wartości współczynników a_0 oraz a_i, b_i ($i = 1, 2, \dots, m$). Współczynniki te wyznacza się ze wzorów Eulera – Fouriera:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Theta_j \\ a_i &= \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n \Theta_j \cos \frac{2\pi i j}{n} \\ b_i &= \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n \Theta_j \sin \frac{2\pi i j}{n} \end{aligned} \right\} \quad i=1,2,\dots,m \quad (3.31)$$

gdzie Θ_j ($j = 1, 2, \dots, n$) są elementami ciągu (3.30).

Błąd aproksymacji trygonometrycznej można wyrazić zależnością:

$$e_G = B = \sum_{i=1}^b (y - y_i)^2 \quad (3.32)$$

gdzie: y - wartość funkcji aproksymującej,

y_i - wartość funkcji aproksymowanej.

Interpolacja wartości parametru diagnostycznego

Założmy, że dane są wartości funkcji $Y(\Theta)$ (wartości parametrów diagnostycznych) na zbiorze punktów czasowych $\Theta_1, \dots, \Theta_k, \dots, \Theta_b$ zwanych węzłami interpolacji. Zadaniem interpolacji jest wyznaczenie przybliżonych wartości funkcji $Y(\Theta)$ zwanej funkcją interpolowaną w punktach nie będących węzłami interpolacji. Funkcja interpolująca jest funkcją pewnej klasy. Najczęściej będzie to wielomian algebraiczny, wielomian trygonometryczny, funkcja wymierna lub funkcja sklejana. Interpolację stosuje się najczęściej, gdy nie znamy analitycznej postaci funkcji $Y(\Theta)$ (jest ona tylko stabilizowana) lub, gdy jej postać analityczna jest zbyt skomplikowana. W opracowaniu, na podstawie badań

wstępnych [116,118,121,130,137,147] została zastosowana interpolacja Lagrange'a oraz interpolacja za pomocą funkcji sklepanych.

Interpolacja Lagrange'a

Zagadnienie interpolacyjne Lagrange'a charakteryzuje się wymaganiem, aby wartości funkcji interpolującej równały się wartościom funkcji interpolowanej w $n+1$ punktach. Załóżmy, że znamy kilka wartości funkcji $Y(\Theta)$ dla kilku argumentów $\Theta_1, \dots, \Theta_k, \dots, \Theta_b$, a chcemy dowiedzieć się, jakie są wartości dla innych argumentów. Można tego dokonać dzięki funkcjom interpolacyjnym. Wymaga się, aby ich wykres przechodził przez węzły interpolacji (punkty dyskretne, których współrzędne znamy) $y(\Theta_1), \dots, y(\Theta_k), \dots, y(\Theta_b)$ a poza nimi przybliżał jak najlepiej pierwowzór.

Aby znaleźć wartości funkcji w każdym punkcie dziedziny, należy na podstawie znajomości kilku wartości dyskretnych wyznaczyć wielomian interpolacyjny. Najprostszy wielomian interpolacyjny w sensie Lagrange'a przyjmuje postać:

$$Y_n(\Theta) = \sum_{i=1}^b y_i \cdot \frac{(\Theta - \Theta_0)(\Theta - \Theta_1)\dots(\Theta - \Theta_{i-1})(\Theta - \Theta_{i+1})\dots(\Theta - \Theta_n)}{(\Theta_i - \Theta_0)(\Theta_i - \Theta_1)\dots(\Theta_i - \Theta_{i-1})(\Theta_i - \Theta_{i+1})\dots(\Theta_i - \Theta_n)} \quad (3.33)$$

Oszacowanie jest w dużym stopniu zależne od rozkładu argumentów punktów dyskretnych Θ_k . Oszacowanie błędu w tej metodzie jest następujące:

$$e_G = |Y(t) - Y_i(t)| \leq \frac{M_{n+1}}{(n+1)!} |w_{n+1}(\Theta)| \quad (3.34)$$

gdzie: $M = \max_{a \leq \Theta \leq b} |y^{n+1}(\Theta)|$,

$$w_{n+1} = (\Theta - \Theta_0)(\Theta - \Theta_1)\dots(\Theta - \Theta_n)$$

Interpolacja za pomocą funkcji sklepanych

W dotychczasowych rozważaniach funkcja była interpolowana jednym wielomianem. Oczywiście, jeśli wzrasta liczba węzłów wzrasta również stopień wielomianu interpolacyjnego i może się okazać, że nie będzie on zbieżny do funkcji interpolowanej.

Można zatem inaczej sformułować problem, mianowicie niech dane będą węzły uporządkowane następująco:

$$a = \Theta_0 < \Theta_1 < \Theta_2 < \dots < \Theta_{n-1} < \Theta_n = b \quad (3.35)$$

W każdym z przedziałów $\langle \Theta_j, \Theta_{j+1} \rangle$ $j=0,1,2,\dots,n-1$ funkcję interpolowaną przybliża się wielomianem stosunkowo niskiego stopnia. Na ogół w każdym przedziale wielomian będzie różny, ale cała funkcja interpolująca powinna być ciągła wraz z odpowiednimi pochodnymi na odcinku $\langle a, b \rangle$. Zagadnienie interpolacyjne za pomocą funkcji sklejanых wymaga, aby ich wykres przechodził przez węzły interpolacji (punkty dyskretne, których współrzędne znamy) $y_1, \dots, y_i, \dots, y_b$, a poza nimi przybliżał jak najlepiej pierwowzór za pomocą odpowiednich funkcji w poszczególnych przedziałach $\langle \Theta_j, \Theta_{j+1} \rangle$.

Na przykład w każdym przedziale $\langle \Theta_j, \Theta_{j+1} \rangle$ funkcja sklejana stopnia 3 przyjmuje postać:

$$Y_j(\Theta) = a_j + b_j(\Theta - \Theta_j) + c_j(\Theta - \Theta_j)^2 + d_j(\Theta - \Theta_j)^3, \quad j = 0,1,2,\dots,n-1 \quad (3.36)$$

przy czym współczynniki a_j, b_j, c_j, d_j wyznacza się następująco:

1. Należy rozwiązać układ równań liniowych o postaci:

$$\begin{bmatrix} 2 & w_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ u_2 & 2 & w_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & u_3 & 2 & w_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & u_{n-2} & 2 & w_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & u_{n-1} & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1^* \\ c_2^* \\ c_3^* \\ \vdots \\ c_{n-2}^* \\ c_{n-1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_{n-2} \\ v_{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$\text{gdzie } \begin{cases} u_{j+1} = \frac{h_j}{h_j + h_{j+1}} & w_{j+1} = \frac{h_{j+1}}{h_j + h_{j+1}} \\ v_{j+1} = \left(\frac{s_{j+2} - s_{j+1}}{h_{j+1}} - \frac{s_{j+1} - s_j}{h_j} \right) : (h_j + h_{j+1}) \end{cases} \quad j = 0,1,2,\dots,n-2$$

$$h_j = \Theta_{j+1} - \Theta_j \quad j = 0,1,2,\dots,n-1$$

$$y_i = y(\Theta_j) \quad j = 0,1,2,\dots,n$$

z którego wyznacza się współczynniki c_i^* $j=1,2,\dots,n-1$;

2. Współczynniki c_i są określone następująco:

$$c_0 = c_n = 0 \quad c_j = 3c_j^* \quad j = 1,2,\dots,n-1 \quad (3.38)$$

a współczynniki a_j, b_j, d_j oblicza się wg zależności:

$$\begin{cases} a_j = s_j \\ b_j = \frac{s_{j+1} - s_j}{h_j} - \frac{h_j}{3}(c_{j+1} + 2c_j) \\ d_j = \frac{c_{j+1} - c_j}{3h_j} \end{cases} \quad j = 0, 1, 2, \dots, n-1. \quad (3.39)$$

Mając obliczone współczynniki wielomianu, można obliczyć szukaną wartość wielomianu, zaś błąd interpolacji za pomocą funkcji sklepanych wyznacza się według zależności:

$$e_G = |Y(\Theta) - Y_i(\Theta)| \leq \frac{1}{2} M h_j^2 \quad (3.40)$$

gdzie: M oznacza stałą, taką że $|Y_i''(\Theta)| \leq M$ dla każdego $\Theta \in [\Theta_1, \Theta_n]$,

Y_i oznacza funkcję sklepaną trzeciego stopnia z węzłami $\Theta_1 < \dots < \Theta_n$ taką, że

$$Y_i(\Theta_j) = Y(\Theta_j) \quad \text{dla } j=1, \dots, n \quad \text{oraz} \quad |Y_i''(\Theta_1)| \leq 3M \quad \text{i} \quad |Y_i''(\Theta_n)| \leq 3M.$$

$$h_j = \Theta_{j+1} - \Theta_j.$$

Analiza przedstawionych powyżej metod wyznaczania wartości genezowanej parametrów diagnostycznych oraz odpowiednich dla nich błędów genezy pozwala stwierdzić, że w celu wyznaczenia wartości genezowanej parametrów diagnostycznych, na podstawie niepewnych i niepełnych ich wartości z przedziału czasu (Θ_1, Θ_b) , należy wykorzystać:

1. W zakresie metod aproksymacyjnych (rys.3.3):

a) aproksymację średniokwadratową punktową wielomianową z błędem genezy e_{ja} :

$$e_{ja} = e_{Gj} = \max_{k=1, K} B = |y_{j,a}(\Theta_k) - y_j(\Theta_k)| \quad (3.41)$$

b) aproksymację trygonometryczną z błędem genezy r_{ja} :

$$e_{ja} = e_{Gj} = \max_{k=1, K} B = |y_{j,a}(\Theta_k) - y_j(\Theta_k)| \quad (3.42)$$

2. W zakresie metod interpolacyjnych (rys.3.2):

a) interpolację za pomocą funkcji sklepanych 1 i 3 stopnia dla przedziału czasu (Θ_1, Θ_b) o liczebności r_1 z błędem genezy $e_{j,int}$ [138]:

$$e_{j,int} = e_{Gj} = \max_{k=1, r_2} B = |y_{j,int}(\Theta_k) - y_j(\Theta_k)| \quad (3.43)$$

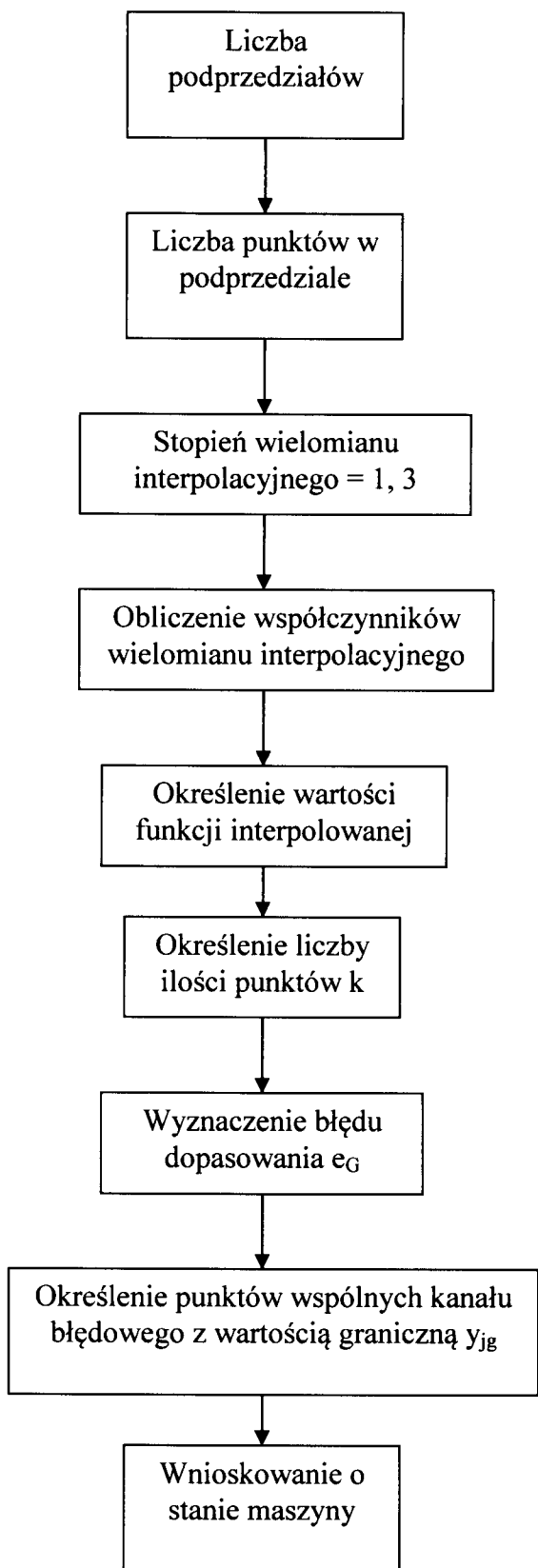
gdzie: $r_1 = \frac{K}{2}$ - ilość punktów do interpolacji wartości szeregu czasowego $y_j(\Theta)$,

$r_2 = \frac{K}{2} - 1$ - ilość punktów do porównania wartości funkcji sklejanych z wartością

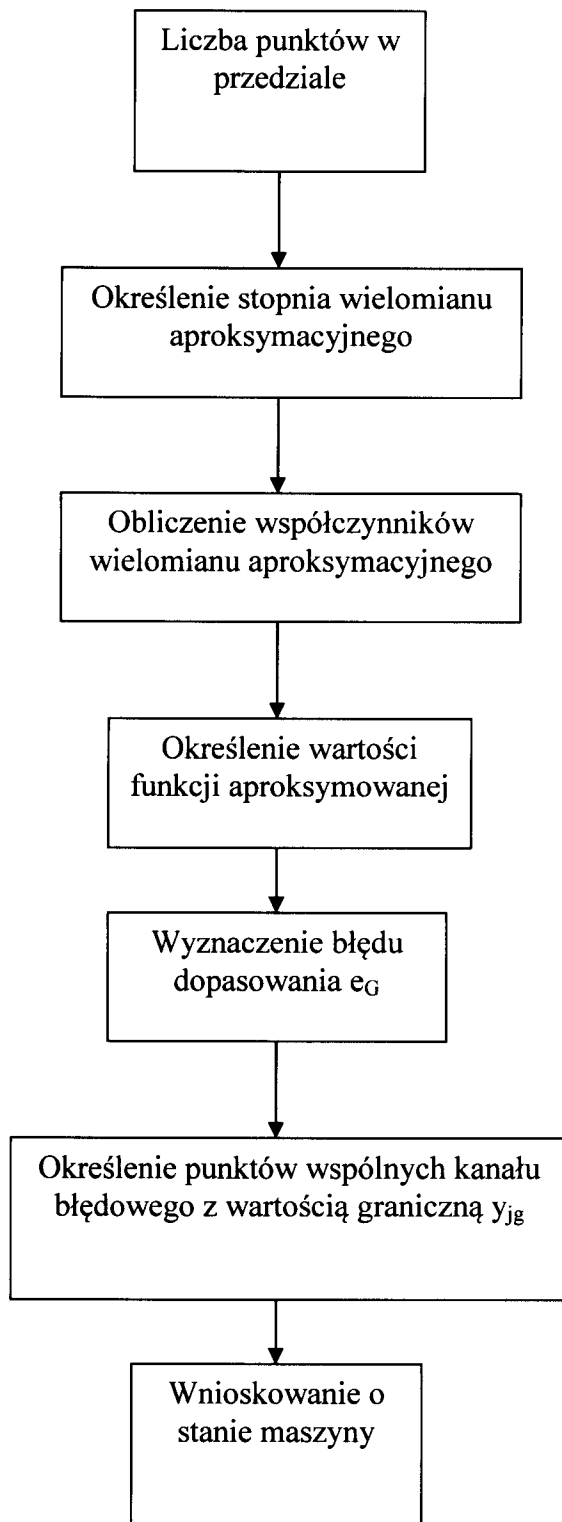
rzeczywistą parametru diagnostycznego oraz interpolacji wartości szeregu czasowego $y_j(\Theta)$,

K – liczebność szeregu czasowego.

Oszacowanie wartości parametrów diagnostycznych, za pomocą przedstawionych powyżej metod genezowania, pozwala wyznaczyć ich wartości genezowane $\{y_{j,ini}(\Theta)\}$, co umożliwi opracowanie algorytmu genezowania stanu maszyny.



Rys. 3.2. Schemat genezowania stanu maszyny przy wykorzystaniu interpolacji za pomocą funkcji sklepanych



Rys.3.3. Schemat genezowania stanu maszyny przy wykorzystaniu metod aproksymacyjnych

Przeprowadzona prezentacja procedur metodyki genezy stanu maszyn pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wszystkie prezentowane algorytmy pozwalają wyznaczyć optymalne, ze względu na przyjmowane kryterium, wartości genezowane parametrów diagnostycznych w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) , przy czym do dalszych badań proponuje się:
 - a) wykorzystanie metod aproksymacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* (metoda średniokwadratowa, metoda trygonometryczna), z promieniem błędu aproksymacji „kanału błędowego” $r_{j,a}$;
 - b) wykorzystanie metod interpolacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* (metoda funkcji sklepanych stopnia 1 i 3) z promieniem błędu interpolacji „kanału błędowego” $r_{j,int}$;
 - b) wybór metody według maksymalnej wartości promienia błędu aproksymacji lub interpolacji (błąd dopasowania);
2. W celu szacowania stanu maszyny w przedziale czasu eksploatacji maszyny $\Theta_K \in (\Theta_1, \Theta_b)$ oraz analizy przyczyny wystąpienia stanu $s_i(T_{LU})$, należy dokonać:
 - a) określenia punktu wspólnego „kanału błędowego” wyznaczonego przez promień błędu $r_j^* = \max(r_{j,a}, r_{j,i})$ i wartość graniczną parametru diagnostycznego y_j^* w chwili $\Theta_S \in (\Theta_1, \Theta_b)$, co oznacza że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu $s_i(\Theta_b)$ było „chwilowe pojawienie” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
 - b) określenia większej liczby punktów wspólnych „kanału błędowego” wyznaczonego przez promień błędu $r_j^* = \max(r_{j,a}, r_{j,i})$ i wartości granicznej parametru diagnostycznego y_j^* w chwilach $\Theta_S \in (\Theta_1, \Theta_b)$ oznacza, że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu $s_i(\Theta_b)$ był „narastający rozwój” stanu s_i w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
 - c) w przypadku braku punktów wspólnych określenie minimalnej odległości d_{min} „kanału błędowego” od wartości granicznej w chwili $\Theta_S \in (\Theta_1, \Theta_b)$, co oznacza że prawdopodobną przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu $s_i(\Theta_b)$ było „chwilowe niepełne pojawienie się” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
 - d) analiza podobieństwa zbioru stanów $\{s_i(\Theta_S)\}$ i zlokalizowanego przez T_{LU} stanu $s_i(\Theta_b)$ w celu określenia przyczyny jego wystąpienia w kontekście otrzymanych ewentualnych „punktów wspólnych”, minimalnej odległości „zbliżeń” oraz znajomości okoliczności i warunków wystąpienia stanów $s_i \in \{s_i(\Theta_S)\}$.

3.4. Wnioski

Reasumując rozpatrzone w tym rozdziale zagadnienia dotyczące podstaw teoretycznych budowy modelu genezowania stanu maszyn należy stwierdzić, że:

1. Proces genezowania stanu maszyny obejmuje następujące rodzaje badań diagnostycznych:
 - a) identyfikację stanu technicznego maszyny;
 - b) optymalizację zbioru parametrów diagnostycznych opisujących zmianę stanu technicznego w funkcji czasu eksploatacji maszyny;
 - c) genezowanie wartości parametrów diagnostycznych;
 - d) szacowanie stanu maszyny w czasie przeszłym eksploatacji.
2. W celu określenia zbioru stanów maszyny uważa się, że najbardziej przydatną może być metoda prawdopodobieństwa uszkodzenia jej elementów.
3. W celu wyznaczenia zbioru parametrów diagnostycznych proponuje się metodę korelacji wartości parametru diagnostycznego ze stanem i czasem eksploatacji maszyny oraz metodę pojemności informacyjnej parametru diagnostycznego.
4. W chwili obecnej nie ma użytkowych metod genezowania stanu maszyn, które można wykorzystać w praktyce, stąd rozpatrzono możliwość wykorzystania:
 - a) w obszarze genezowania wartości parametrów diagnostycznych: metody aproksymacyjne (średniokwadratowa punktowa wielomianowa, trygonometryczna) i metody interpolacyjne (wielomianowa, funkcji sklepanych 1 i 3 stopnia);
 - a) w obszarze analizy przyczyny zaistnienia stanu maszyny badanie odległości przedziału błędu genezy wartości genezowanej parametru diagnostycznego od jego wartości granicznejoraz opracowano odpowiadające im procedury.
4. Prezentowane procedury pozwalają wyznaczyć optymalne, ze względu na przyjmowane kryteria:
 - a) zbiory parametrów diagnostycznych;
 - b) wartości genezowane parametrów diagnostycznych;
 - c) szacowanie przyczyny stanu niezdatności określonego w chwili badania maszyny Θ_b ;co wymaga, w celu wyboru najlepszego rozwiązania, ich weryfikacji.
5. Przeprowadzenie weryfikacji opracowanych procedur genezowania stanu wymaga ich implementacji i przeprowadzenia odpowiednich badań wybranych układów maszyn, w celu uzyskania zbioru stanów i zbioru wartości parametrów diagnostycznych. Powyższe postulaty znalazły swoje spełnienie w następujących rozdziałach opracowania.



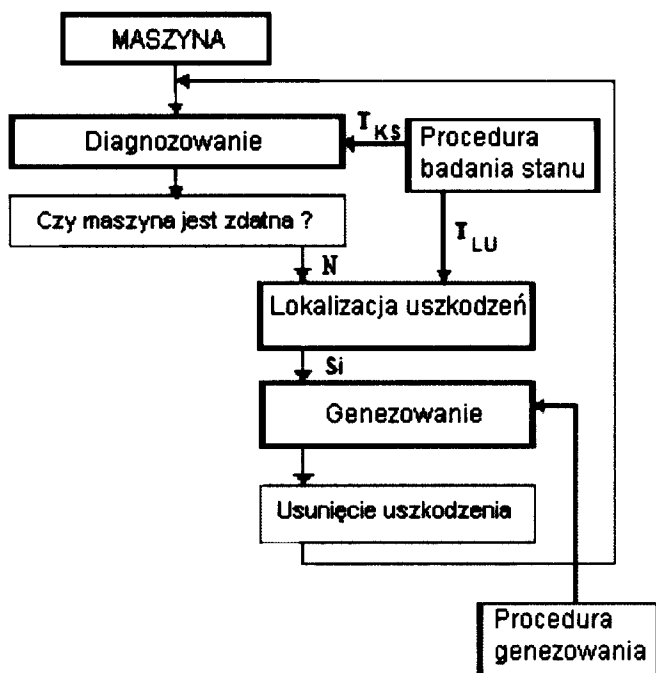
4. METODYKA GENEZOWANIA STANU MASZYNY

W rozdziale tym, na podstawie opracowanego w rozdziale 3 modelu genezowania stanu, przedstawiono jego algorytm. Umożliwiło to na opracowanie koncepcji implementacji metodyki genezowania stanu i programu komputerowego „Genezowanie Stanu”.

4.1. Algorytm genezowania stanu maszyn

Realizacja opracowanych w rozdziale 3 pracy procedur optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych i optymalnej metody genezowania powinna zapewnić:

- optymalizację zbioru parametrów diagnostycznych Y ;
- wyznaczenie przyczyny zlokalizowanego, w trakcie realizacji testu diagnostycznego T_{LU} , stanu maszyny s_i (rys.4.1).



Rys.4.1. Schemat wykorzystania procedury genezowania stanu w rozpoznawania stanu maszyn

Algorytm realizacji procesu genezowania stanu maszyny zawiera następujące etapy:

1. Akwizycja danych

Podczas akwizycji danych uzyskuje się:

- a) zbiór wartości parametrów diagnostycznych w funkcji czasu eksploatacji maszyny $\{y_j(\Theta_k)\}$, uzyskanych w czasie realizacji eksperymentu bierno – czynnego, gdzie $\Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)$;
- b) zbiór wartości parametrów diagnostycznych: $\{y_j(\Theta_1)\}$ – wartości nominalne, $\{y_{jg}\}$ – wartości graniczne, $j=1, \dots, m$;
- c) zbiór stanów maszyny $\{\Theta_k: \{s_i\}, k=1, \dots, K; i=1, \dots, I\}$ uzyskanych w czasie realizacji eksperymentu bierno – czynnego, gdzie $\Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)$;
- d) koszt parametrów diagnostycznych $c(y_j) = \text{const}$.

2. Optymalizacja zbioru wartości parametrów diagnostycznych

Zbiór parametrów diagnostycznych wyznacza się za pomocą:

- a) metody korelacji wartości parametrów diagnostycznych ze stanem maszyny (z czasem eksploatacji, $r_j = r(W, y_j)$, ($r_j = r(\Theta, y_j)$) (3.17, 3.18);
- b) metody ilości informacji parametrów diagnostycznych o stanie maszyny h_j (3.19, 3.20, 3.21);
- c) redukcja zbioru parametrów diagnostycznych (3.22, 3.23, 3.24).

3. Genezowanie stanu – ustalenie przyczyny wystąpienia zlokalizowanego w trakcie realizacji testu T_{LU} , stanu $s_i(T_{LU})$:

1. Genezowanie wartości zbioru parametrów diagnostycznych $\{y_j^*\}$:

- a) za pomocą metody aproksymacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) wraz z promieniem błędu aproksymacji „kanału błędowego” $r_{j,a}$ metodami (metoda średniokwadratowa, metoda trygonometryczna);
- b) za pomocą interpolacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) wraz z promieniem błędu interpolacji „kanału błędowego” $r_{j,int}$ metodami (metoda funkcji sklejaných);
- c) wybór metody według minimalnej wartości promienia błędu aproksymacji lub interpolacji (błąd dopasowania).

2. Analiza przyczyny wystąpienia stanu $s_i(T_{LU})$:

- a) prezentacja zbioru $\{s_i(\Theta_k), i=1, \dots, I; k=1, \dots, K\}$;
- b) określenie punktu wspólnego „kanału błędowego” wyznaczonego przez promień błędu $r^* = \max(r_{j,a}, r_{j,int})$ i wartość graniczną parametru diagnostycznego y_j^* w chwili $\Theta_S \in (\Theta_1, \Theta_b)$, co oznacza że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s_i było „chwilowe pojawienie” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;

- c) określenie większej liczby punktów wspólnych „kanału błędowego” wyznaczonego przez promień błędu $r^* = \max(r_{j,a}, r_{j,int})$ i wartości granicznej parametru diagnostycznego y_j^* w chwilach $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$ oznacza, że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s_i był „narastający rozwój” stanu s_i w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
- d) w przypadku braku punktów wspólnych określenie minimalnej odległości „kanału błędowego” od wartości granicznej w chwili $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$, co oznacza że prawdopodobną przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s_i było „chwilowe niepełne pojawienie się” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
- e) analiza elementów zbioru stanów $\{s_i(\Theta_k), k=1, \dots, K\}$ i zlokalizowanego przez T_{LU} stanu s_i w celu określenia przyczyny jego wystąpienia w kontekście otrzymanych ewentualnych „punktów wspólnych” lub minimalnej odległości „zbliżeń”;
- f) określenie przyczyny stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ przez badanie zależności okoliczności wystąpienia odległości minimalnej d_{min} dla analizowanych stanów $s_i = \{\{s_i(\Theta_k)\}$ w kontekście wystąpienia chwilowego stanu s_i w przeszłości oraz warunków wystąpienia stanu s_i (obciążenie, warunki terenowe, warunki klimatyczne).

4.2. Implementacja metodyki genezowania stanu maszyn

Zakres implementacji procedur metodyki genezowania stanu został sformułowany na podstawie opracowanego algorytmu metodyki genezowania stanu maszyn, to jest:

- a) badanie zbioru parametrów diagnostycznych w aspekcie wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych do genezowania wartości parametrów diagnostycznych;
- b) Badanie jakości genezowania w aspekcie:
 - wyznaczenia metody genezowania według funkcji błędu genezy,
 - badanie wpływu liczebności zbioru parametrów diagnostycznych na błąd genezy.

Opierając się na powyższych ustaleniach oraz wykorzystując wyniki analizy komputerowej w diagnostyce maszyn [60,61] sformułowano zadania do zaimplementowania, to jest:

1. Pozyskanie danych pomiarowych:
 - a) wprowadzanie danych;
 - b) import danych z innych systemów bazodanowych lub z plików tekstowych;

- c) edycja danych;
 - d) zapis wprowadzonych danych do bazy danych.
2. Optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych.
3. Genezowanie stanu maszyny:
- a) określenie zbioru metod genezowania;
 - b) obliczenie wartości genezowanej parametrów diagnostycznych,
 - c) wyznaczenie błędu genezy,
 - d) wyznaczenie wartości minimalnych odległości przedziału błędu od wartości granicznej parametru diagnostycznego;
 - e) zapisanie wyników genezy do bazy danych, celem przeprowadzenia analiz porównawczych.
4. Raportowanie i wizualizacja danych:
- a) wizualizacja wybranych szeregów w formie wykresów liniowych i punktowych;
 - b) możliwość powiększenia wybranego obszaru wykresu;
 - c) możliwość przesuwania zawartości wykresu;
 - d) wyświetlanie w formie tabelarycznej wyników przeprowadzanych symulacji.

W wyniku analizy powyższych ustaleń zostały wyznaczone następujące moduły programu komputerowego „Genezowanie Stanu”:

- a) **Akwizycja Danych** (wprowadzanie, edycja, zapis, interpolacja i aproksymacja danych wejściowych),
- b) **Optymalizacja Parametrów Diagnostycznych** (macierz obserwacji, relacje parametr - stan, redukcja zbioru parametrów diagnostycznych według metody „punktu idealnego”);
- c) **Genezowanie Stanu** (wartość genezowana, błąd genezy, wyznaczenie i badanie wartości minimalnych odległości przedziału błędu od wartości granicznej parametru, badanie przyczyny zlokalizowanych stanów maszyn);
- d) **Raportowanie** (grupowanie poszczególnych symulacji celem porównania wyników).

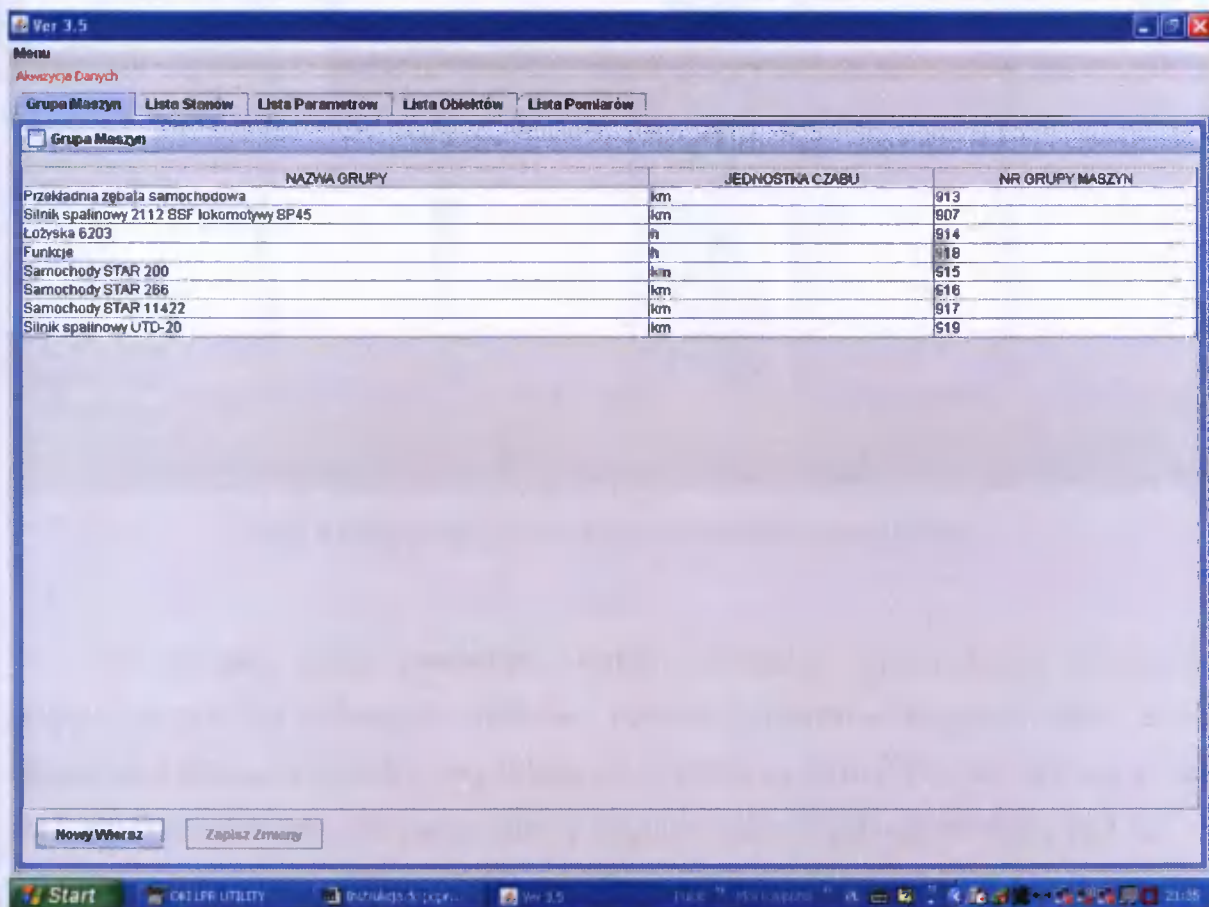
Opracowany program komputerowy pracuje w systemie Windows [128]. Został on napisany w języku Java z wykorzystaniem Firebird 1.5 jako silnika bazodanowego. Ponadto w programie wykorzystano zaawansowane komponenty pakietu Swing dla pakietu Java(TM) SE Runtime Environment 6.

Akwizycja Danych

Moduł akwizycji składa się z pięciu zakładek (rys. 4.2):

- a) Grupa Maszyn,
- b) Lista Stanów,
- c) Lista Parametrów,
- d) Lista Obiektów,
- e) Lista Pomiarów.

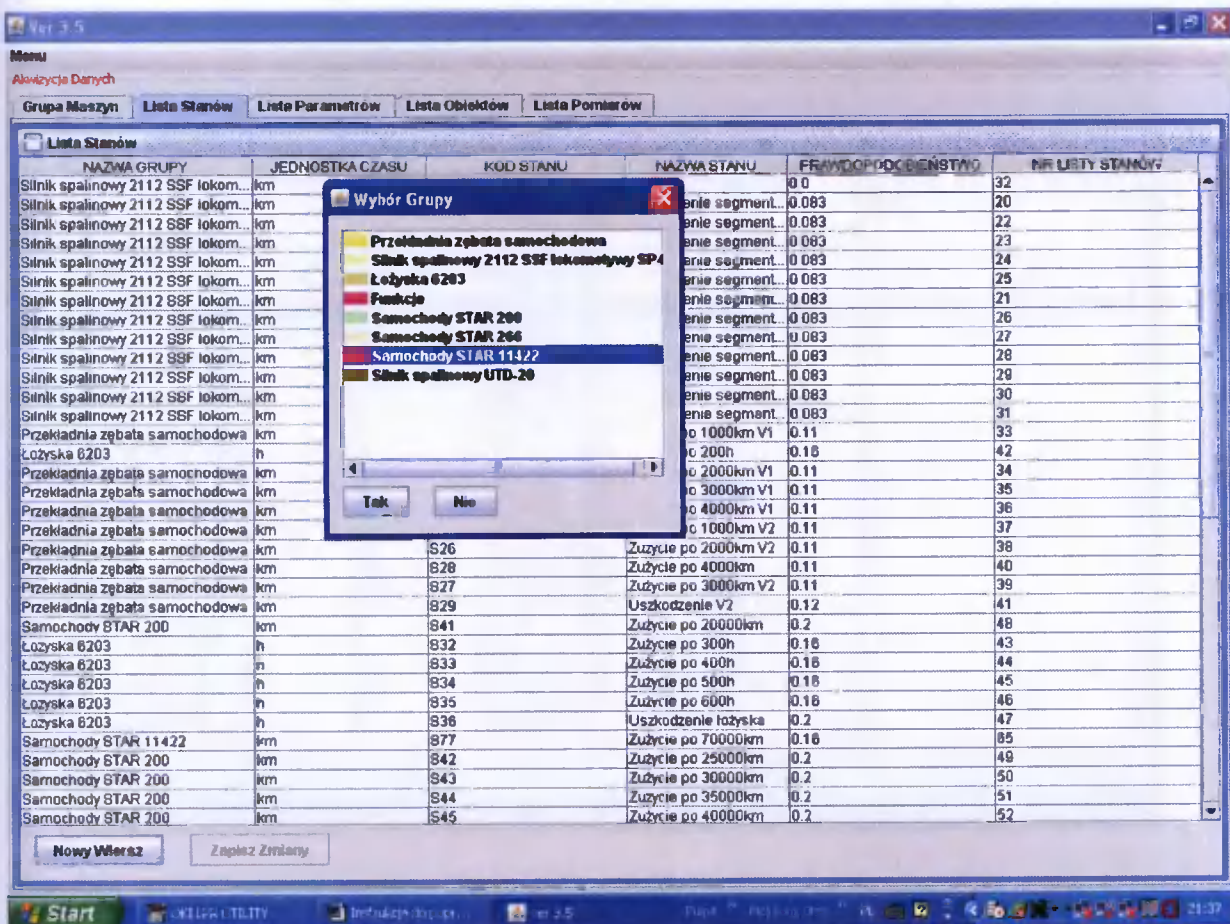
W zakładce **Grupa Maszyn** wprowadza się nazwę grupy maszyn oraz jednostkę obowiązującą dla tej grupy, NR_GRUPY jest nadawany automatycznie po zatwierdzeniu zmian z pomocą przycisku Zapisz Zmiany (rys.4.2).



Rys.4.2. Okno modułu Akwizycja Danych z zakładką Grupa Maszyn

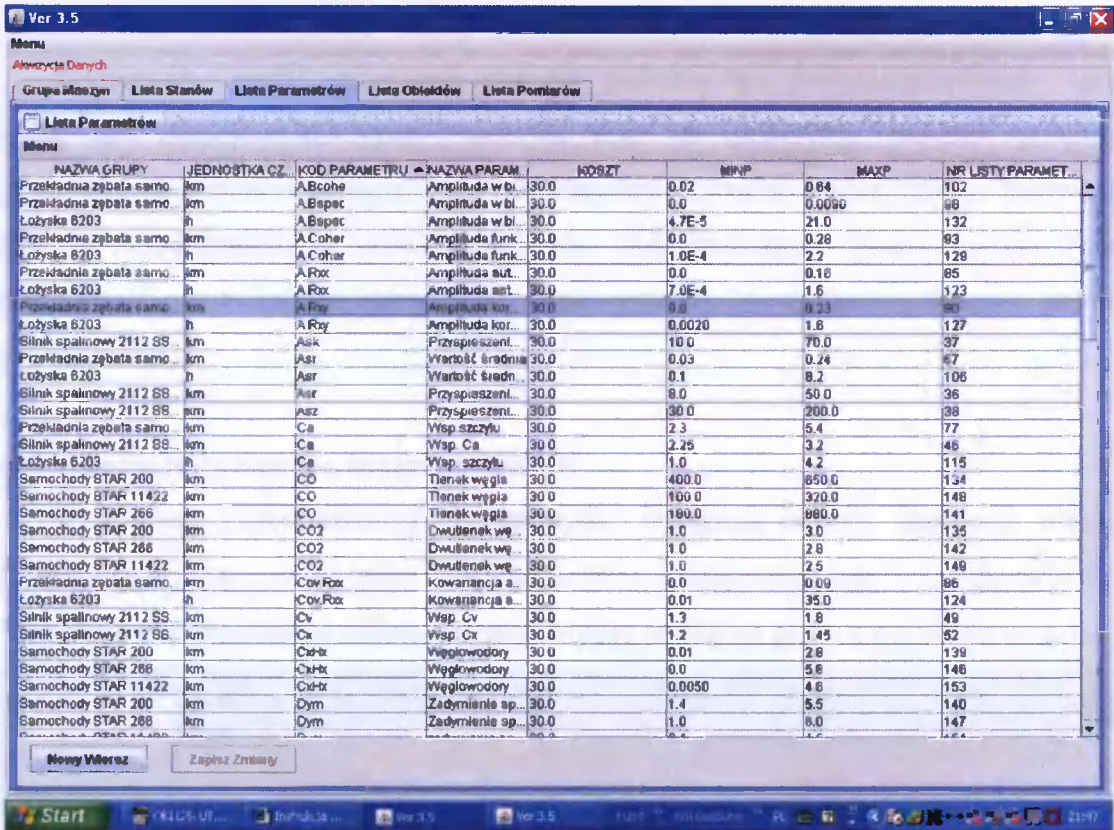
W zakładce **Lista Stanów** można wprowadzić możliwe stany dla wybranej grupy maszyn, NR_LISTY_STANÓW jest nadawany automatycznie i jest niepowtarzalny w zakładce Lista Stanów (rys. 4.3).

W zakładce **Lista Obiektów** i zakładce **Lista Parametrów** można wprowadzić możliwe nazwy obiektów i nazwy parametrów dla wybranej grupy maszyn (rys.4.4) z jednoczesną możliwością ich usuwania.

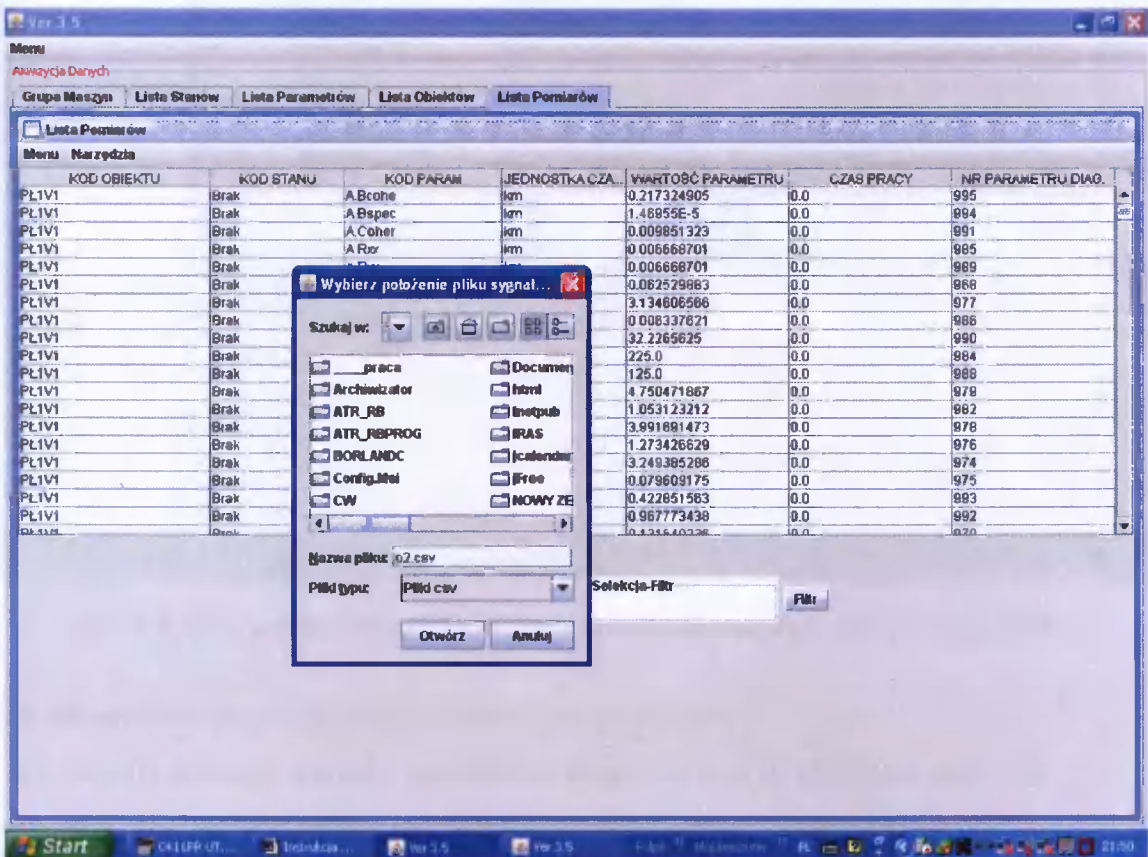


Rys. 4.3. Wybór grupy maszyn przy wprowadzaniu nowego stanu

W zakładce **Lista Pomiarów** istnieje możliwość wprowadzania parametrów diagnostycznych dla wybranych obiektów, wartości parametrów diagnostycznych można wprowadzać ręcznie (Przycisk Nowy Wiersz) lub za pomocą pliku CSV – po wyborze z menu dla Listy Pomiarów opcji wczytaj parametry diagnostyczne dla jednego obiektu (rys.4.5).



Rys.4.4. Edycja zawartości wybranych kolumn dla zakładki Lista Parametrów wybranego pola Kod_Stanu

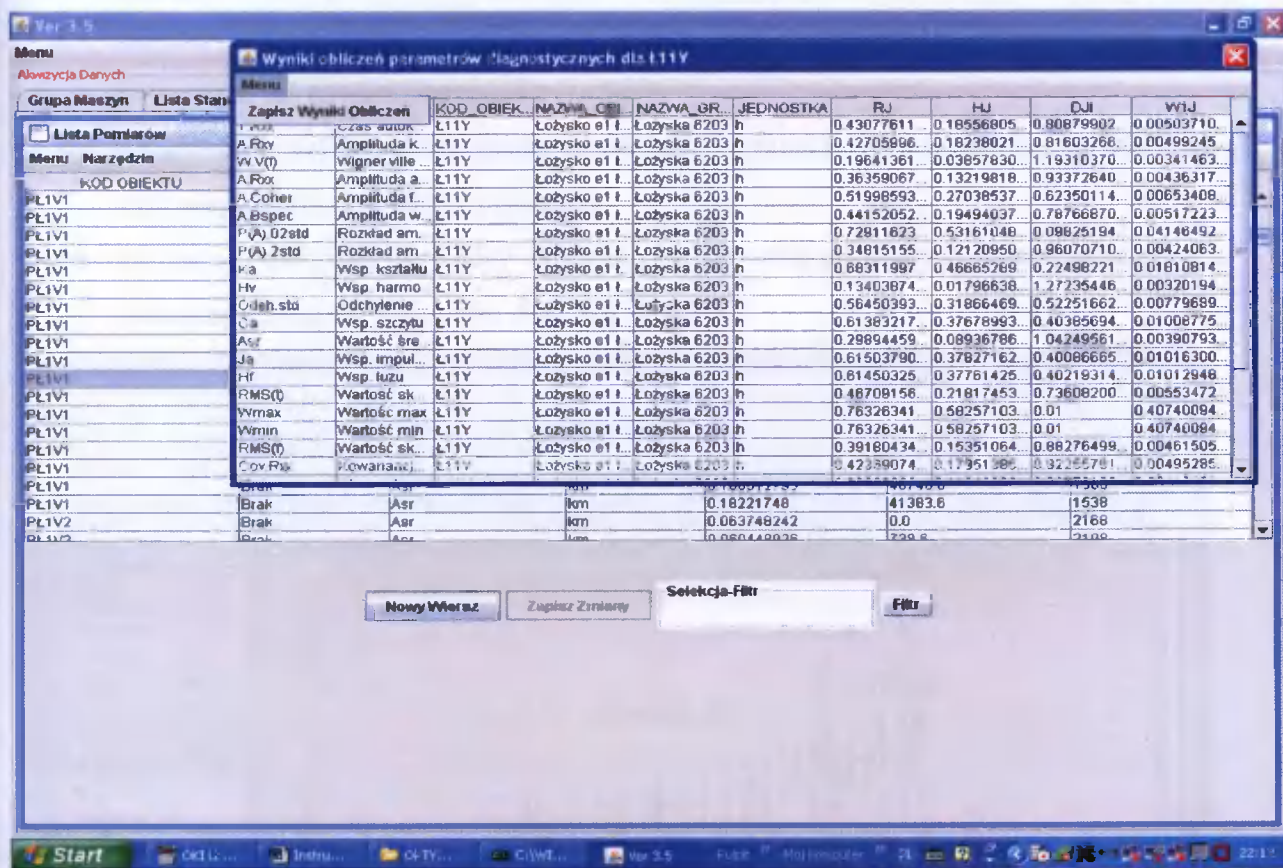


Rys. 4.5. Import wartości parametrów diagnostycznych z pliku CSV

Reasumując moduł akwizycji danych pozwala na przyporządkowanie maszyn, układów lub zespołów do grupy maszyn, oraz na akwizycję wartości parametrów diagnostycznych i stanów maszyny dla odpowiednich czasów (przebiegów). Przewidziano możliwość zdefiniowania ilości parametrów diagnostycznych grupy maszyn (zmiany wartości granicznych, kosztu, nazwy itd., oraz usunięcia lub dodania kolejnego parametru diagnostycznego).

Optymalizacja Parametrów Diagnostycznych

W module Optymalizacja Parametrów Diagnostycznych następuje obliczenie wartości funkcji kryterialnych oraz wag parametrów diagnostycznych na podstawie danych wejściowych dla wybranego obiektu z możliwością zapisu do pliku tekstowego (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Okno modułu Optymalizacja Parametrów Diagnostycznych dla wybranego obiektu

Zbiór parametrów diagnostycznych wyznacza się za pomocą:

- metody korelacji wartości parametrów diagnostycznych ze stanem maszyny;
- metody ilości informacji parametrów diagnostycznych o stanie maszyny h_j ;

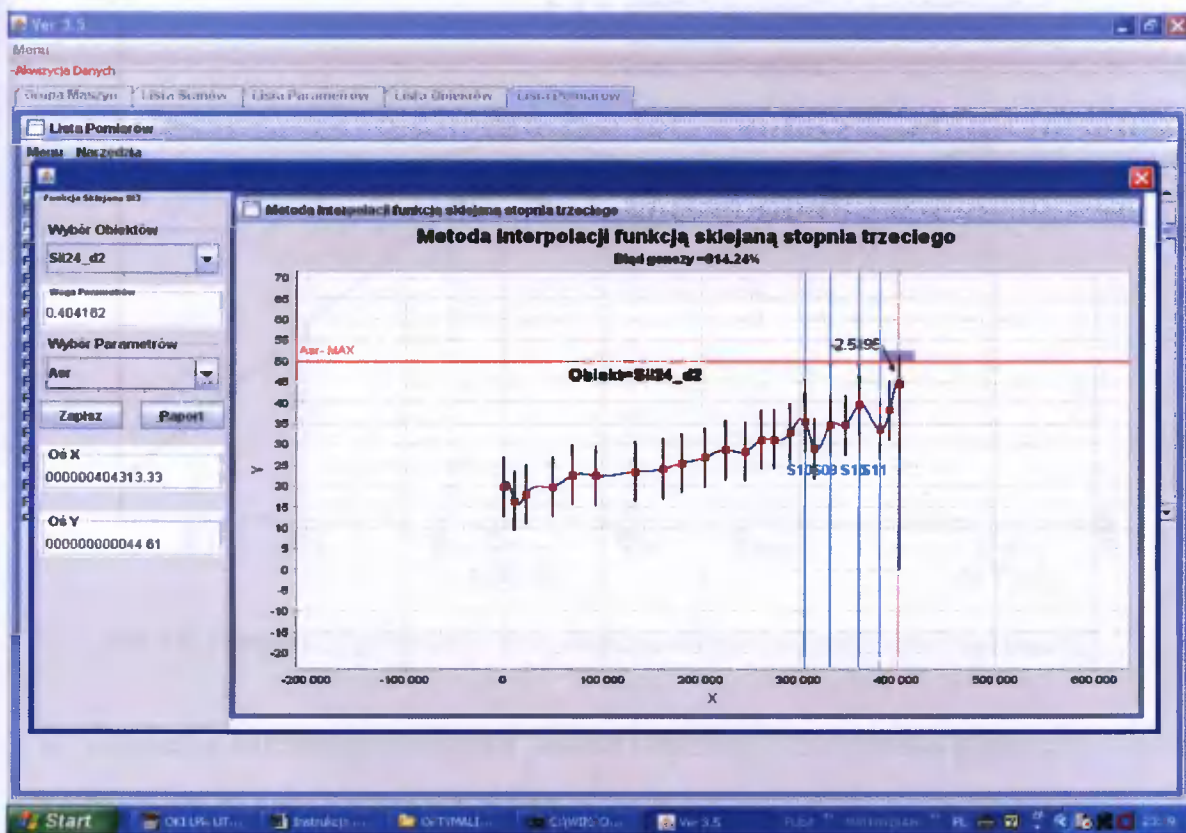
d) w celu wyboru zbioru parametrów diagnostycznych wykorzystuje się wartości wag w_1 .

Jako kryterium wyboru parametru diagnostycznego (parametrów diagnostycznych) przyjęto maksymalizację wartości wag w_1 i wybranie parametrów diagnostycznych według tego kryterium. Dla każdego parametru diagnostycznego wyliczane są wartości współczynnika korelacji liniowej i wskaźnik ilości informacji.

Genezowanie Stanu

W module tym następuje (rys 4.7):

- wyznaczenie wartości genezowanej parametru diagnostycznego i błędu genezy;
- wyznaczenie minimalnej odległości wartości genezowanej parametru diagnostycznego od jego wartości granicznej;
- badanie wpływu czynników eksploatacyjnych (liczba parametrów, liczebność szeregu czasowego) na genezę stanu;
- wizualizacja i zapis funkcji aproksymacji lub interpolacji dla wybranych parametrów wybranego obiektu w postaci rysunku;
- obliczenie odległości pomiędzy wartością genezowaną parametru diagnostycznego a wartością graniczną parametru diagnostycznego.



Rys. 4.7. Metoda interpolacji funkcją sklejaną stopnia trzeciego z modułu Genezowanie Stanu

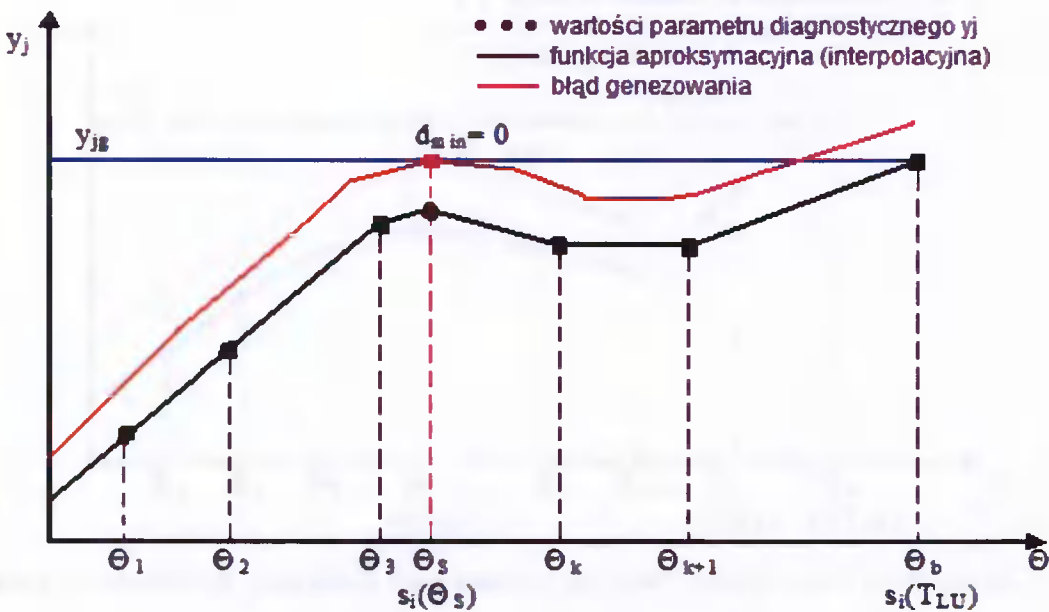
Szacowanie wartości genezowanej parametru diagnostycznego oraz określenie przyczyny wystąpienia przyczyny stanu niezdatności s_i w chwili badania maszyny wyznacza się za pomocą algorytmu przedstawionego powyżej, tj.:

1. Genezowanie wartości zbioru parametrów diagnostycznych $\{y_j^*\}$:

- za pomocą metod aproksymacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* ;
- za pomocą metod interpolacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* ;
- wyбір metody według minimalnej wartości promienia błędu aproksymacji lub interpolacji e_G ;

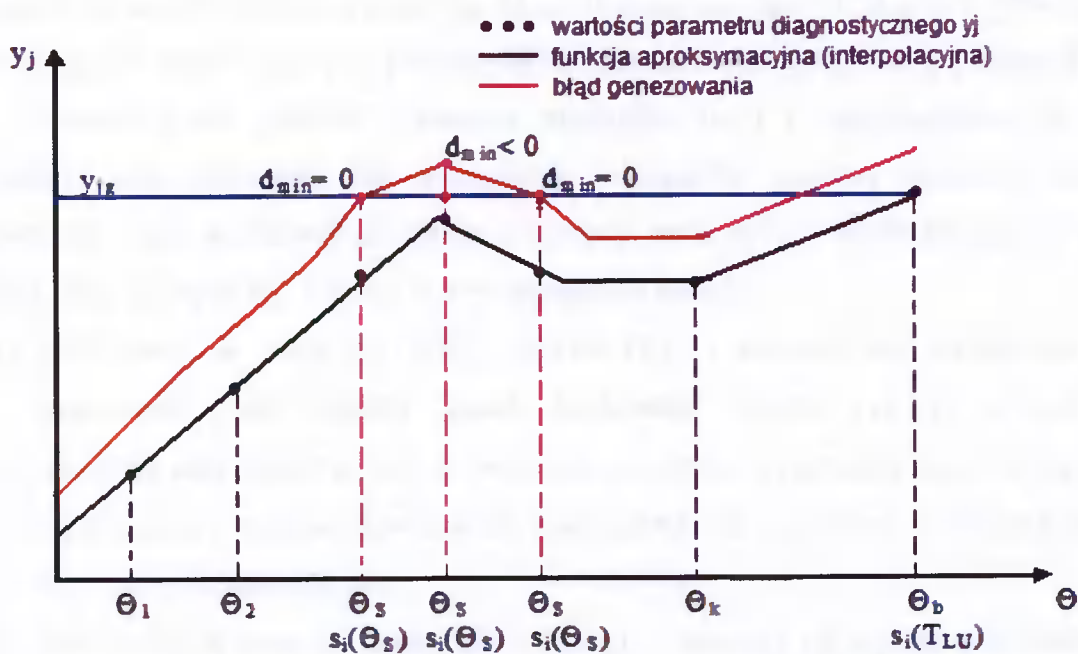
2. Analiza przyczyny wystąpienia stanu $s_i(T_{LU})$ poprzez prezentację zbioru $\{s_i(\Theta_k), i=1, \dots, 1; k=1, \dots, K\}$ w przedziale $\Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)$ i jego analizę w celu:

- określenia punktu wspólnego „kanału błędowego” wyznaczonego przez promień błędu r_j^* i wartość graniczną parametru diagnostycznego y_j^* w chwili $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$, $d_{\min}=0$ (rys.4.8, 4.10);
- określenia większej liczby punktów wspólnych „kanału błędowego” (np. n - punktów) wyznaczonego przez promień błędu r_j^* i wartości granicznej parametru diagnostycznego y_j^* w chwilach $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$, $d_{\min}=0$ (rys. 4.9);

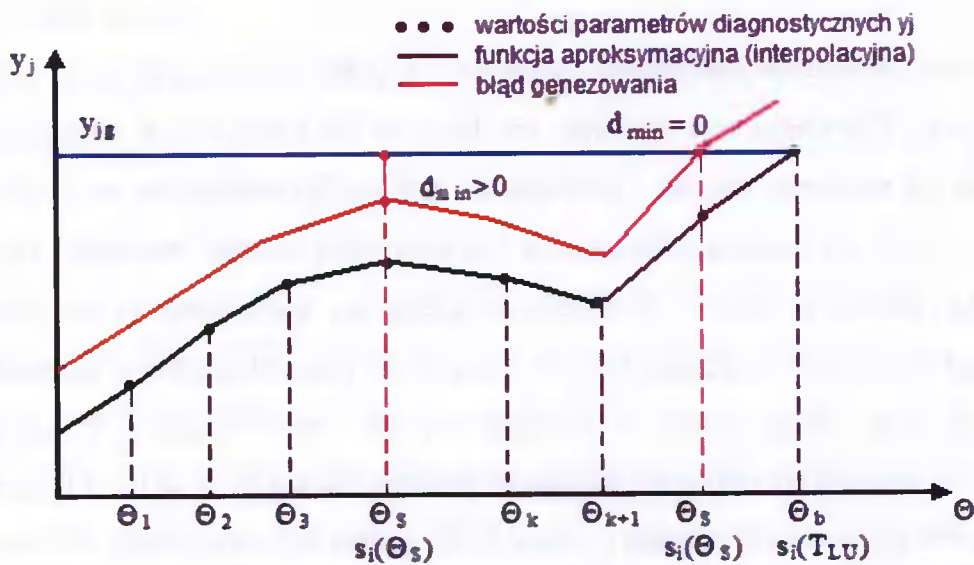


Rys.4.8. Interpretacja genezowania stanu maszyny dla jednego punktu wspólnego ($d_{\min}=0$)

- określenia minimalnej odległości „kanału błędowego” od wartości granicznej w chwili $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$, $d_{\min}<0$ (rys.4.9, 4.10);



Rys.4.9. Interpretacja genezowania stanu maszyny dla n punktów wspólnych ($n(d_{\min}=0)$) i dla $d_{\min}<0$



Rys.4.10. Interpretacja genezowania stanu maszyny dla $d_{\min}>0$ i jednego punktu wspólnego ($d_{\min}=0$)

d) analiza elementów zbioru stanów $\{s_i(\Theta_k), k=1, \dots, K\}$ i zbioru stanów $\{s_i(\Theta_s)\}$ oraz zlokalizowanego stanu $s_i(TLU)$ w celu określenia przyczyny jego wystąpienia.

Dla każdego parametru diagnostycznego wybranego w module „Parametry Diagnostyczne” określana jest ilość „zblżeń” aproksymowanej (interpolowanej) wartości

parametru diagnostycznego z obliczonym błędem genezy $e_{Gj} = \max(r_{j,a}, r_{j,int})$ do wartości granicznej parametru diagnostycznego y_{jg} ($d_{min}=0$, $nd_{min}=0$, $d_{min}>0$, $d_{min}<0$). Jednocześnie pojawia się lista stanów $\{s_i(\Theta_k)\}$, które zostały określone w module „Akwizycja danych”.

Analiza ilości „zblizeń” (wartości minimalne d_{min}) i odpowiadające im stany $s_i \in \{s_i(\Theta_k)\}$ oraz warunków ich wystąpienia (obciążenie, warunki terenowe, warunki klimatyczne, inne) umożliwia określenie przyczyny stanu $s_i(T_{LU})$, stwierdzonego w chwili badania stanu maszyny Θ_b . Wynika to z następujących ustaleń:

- a) jeśli znane są stany $s_i \in \{s_i(\Theta_k), \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$ i warunki ich wystąpienia oraz pojedynczy punkt wspólny „kanału błędowego” ($d_{min}=0$, rys.4.8) w chwili Θ_s wyróżnia stan $s_i(\Theta_s)=s_i(T_{LU})$ to wówczas przyczyną wystąpienia stanu $s_i(T_{LU})$ były okoliczności i warunki określone dla stanu $s_i(\Theta_s)$ oraz „chwilowe pojawienie się” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
- b) jeśli znane są stany $s_i \in \{s_i(\Theta_k), \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$ i warunki ich wystąpienia oraz wiele punktów wspólnych „kanału błędowego” ($nd_{min}=0$, $d_{min}<0$, rys.4.9) w chwili Θ_s wyróżnia stan $s_i(\Theta_s)=s_i(T_{LU})$ to wówczas przyczyną wystąpienia $s_i(T_{LU})$ były okoliczności i warunki określone dla stanu $s_i(\Theta_s)$ oraz „narastający rozwój” tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
- c) jeśli znane są stany $s_i \in \{s_i(\Theta_k), \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$ i warunki ich wystąpienia oraz odległość minimalna $d_{min}>0$ (rys.4.10) w chwili Θ_s wyróżnia stan $s_i(\Theta_s)=s_i(T_{LU})$ to wówczas przyczyną wystąpienia $s_i(T_{LU})$ były okoliczności i warunki określone dla stanu $s_i(\Theta_s)$ oraz „chwilowe niepełne pojawienie się” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
- d) jeśli nie są znane stany $s_i \in \{s_i(\Theta_k), \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$ i znane są warunki eksploatacji maszyny w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) oraz wartość odległości minimalnej $d_{min} = (d_{min}=0 \vee d_{min}>0 \vee d_{min}<0)$ chwili Θ_s jest zbliżona (z błędem około 10%) do wartości $d_{min}(s_i(T_{LU}))$ to wówczas jest możliwe określenie przyczyny wystąpienia stanu $s_i(T_{LU})$, bowiem prawdopodobnie będą to okoliczności i warunki określone dla chwili Θ_s ;
- e) jeśli nie są znane stany $s_i \in \{s_i(\Theta_k), \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$ i nie są znane warunki eksploatacji maszyny w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) oraz wartość odległości minimalnej $d_{min} = (d_{min}=0 \vee d_{min}>0 \vee d_{min}<0)$ w chwili Θ_s nie jest zbliżona (z błędem około 10%) do wartości $d_{min}(s_i(T_{LU}))$ to wówczas nie jest możliwe określenie przyczyny wystąpienia stanu $s_i(T_{LU})$.

Przedstawione opcje określania przyczyny stanu $s_i(T_{LU})$ ograniczone są z przyjęciem wielu uwarunkowań związanych z procesem eksploatacji maszyn. Powoduje to, że konieczna jest ich weryfikacja na podstawie badań wybranych układów maszyn.

Raportowanie

Przedstawiane są wyniki badań symulacyjnych procedur genezowania stanu grupy maszyn lub obiektów maszyn:

1. Optymalny zbiór parametrów diagnostycznych z wartościami współczynnika korelacji liniowej $r_j = r(\Theta_i, y_j)$, współczynnika pojemności informacyjnej parametru diagnostycznego h_j oraz wagi w_{1j} ;
2. Geneza stanu. Dane umożliwiające interpretację i wyjaśnienie przyczyny, zlokalizowanego podczas badania stanu $s_i(T_{LU})$: „Czas pracy (przebieg)”, „Stan maszyny”, „Waga w_{1j} ”, „Błąd genezy dla metody genezowania wartości parametru diagnostycznego”, „Opis zbliżeń – odległości od wartości granicznej parametru diagnostycznego” i „Minimalna odległość d_{\min} wraz z wykresem interpretacji genezowania stanu”.

Raportowanie odbywa się poprzez grupowanie poszczególnych symulacji celem porównania wyników oraz wizualizację danych poprzez rysowanie wybranych szeregów w formie wykresów liniowych, możliwość powiększenia wybranego obszaru wykresu oraz przedstawienie w formie tabelarycznej wyników przeprowadzanych symulacji.

4.3. Wnioski

Reasumując rozpatrzone w rozdziale zagadnienia dotyczące metodyki genezowania stanu technicznego maszyny oraz jej implementacji należy stwierdzić, że:

1. Na podstawie opracowanej metodyki i algorytmów genezowania stanu maszyn opracowano projekt programu komputerowego procesu genezowania stanu obejmujący następujące moduły:

- a) Akwizycja Danych (wprowadzanie, edycja, zapis, interpolacja i aproksymacja danych wejściowych);
- b) Optymalizacja Parametrów Diagnostycznych (wielokryterialna optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych);
- c) Genezowanie Stanu (wartość genezowana, błąd genezy, badanie wpływu czynników eksploatacyjnych na genezę, badanie przyczyny zlokalizowanych stanów maszyn);
- d) Raportowanie (grupowanie poszczególnych symulacji celem porównania wyników).

2. Istotnymi oryginalnymi osiągnięciami programu komputerowego „Genezowanie Stanu” są opracowane opcje:

- a) badania zbioru parametrów diagnostycznych w aspekcie wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych do genezowania ich wartości;
- b) badania metodyki genezowania stanu:
 - wyznaczenie metody genezowania według funkcji błędu genezy,
 - szacowanie przyczyny stanu niezdatności maszyny $s_i(T_{LU})$ na podstawie badania odległości między wartością genezowaną parametru diagnostycznego z błędem genezy i wartością graniczną parametru diagnostycznego oraz określenie wartości minimalnej d_{min} w chwili Θ_S ,
 - analiza elementów zbioru stanów $\{s_i(\Theta_S)\}$ oraz stanu $s_i(T_{LU})$ w celu określenia przyczyny jego wystąpienia;

3. W celu przeprowadzenia weryfikacji procedur metodyki genezowania stanu niezbędne są zbiory danych sformułowane w module Akwizycja Danych, stąd konieczne jest przeprowadzenie badań diagnostycznych wybranych układów maszyn, co przedstawiono w następnym rozdziale pracy.

5. BADANIA WERYFIKACYJNE PROCEDUR METODYKI GENEZOWANIA STANU MASZYN

W rozdziale po przedstawieniu wyników badań stanowiskowych i eksploatacyjnych wybranych układów maszyn sformułowano algorytm badań procedur metodyki genezowania stanu. Umożliwiło to przeprowadzenie, przy wykorzystaniu programu komputerowego „Genezowanie Stanu”, badań procedur metodyki dla przekładni zębatej samochodowej oraz silników spalinowych samochodu Star11422. Analiza wyników badań pozwoliła na weryfikację procedur metodyki genezowania stanu oraz na określenie, dedykowanych dla badanych układów maszyn, reguł wnioskowania diagnostycznego.

5.1. Badania stanowiskowe i eksploatacyjne wybranych układów maszyn

Aby przeprowadzić badania procedur metodyki genezowania stanu niezbędne są zbiory danych, które zostały opisane w module „Akwizycja danych”. W tym celu w ramach projektu badawczego 4T07B03326 „Opracowanie metodyki optymalizacji procesu rozpoznawania stanu maszyn” przeprowadzono badania stanowiskowe przekładni zębatej samochodowej oraz badania eksploatacyjne silnika spalinowego samochodu Star11422. Uzyskano zbiory parametrów diagnostycznych oraz zbiory stanów, związane z procesem zużycia wynikające z przebiegu samochodu Star11422 oraz z procesem zużycia i symulowanych stanów niezdatności dla przekładni zębatej samochodowej [128]. Zebrane informacje z badań diagnostycznych wymienionych obiektów niezbędne są do weryfikacji opracowanej opracowanych procedur metodyki genezowania stanu, tj.:

- a) procedury optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych;
- b) procedury wyznaczania metody generowania wartości parametrów diagnostycznych;
- c) procedury szacowania stanu niezdatności maszyny;

W tym celu zrealizowano następujące formy eksperymentów diagnostycznych [121,128]:

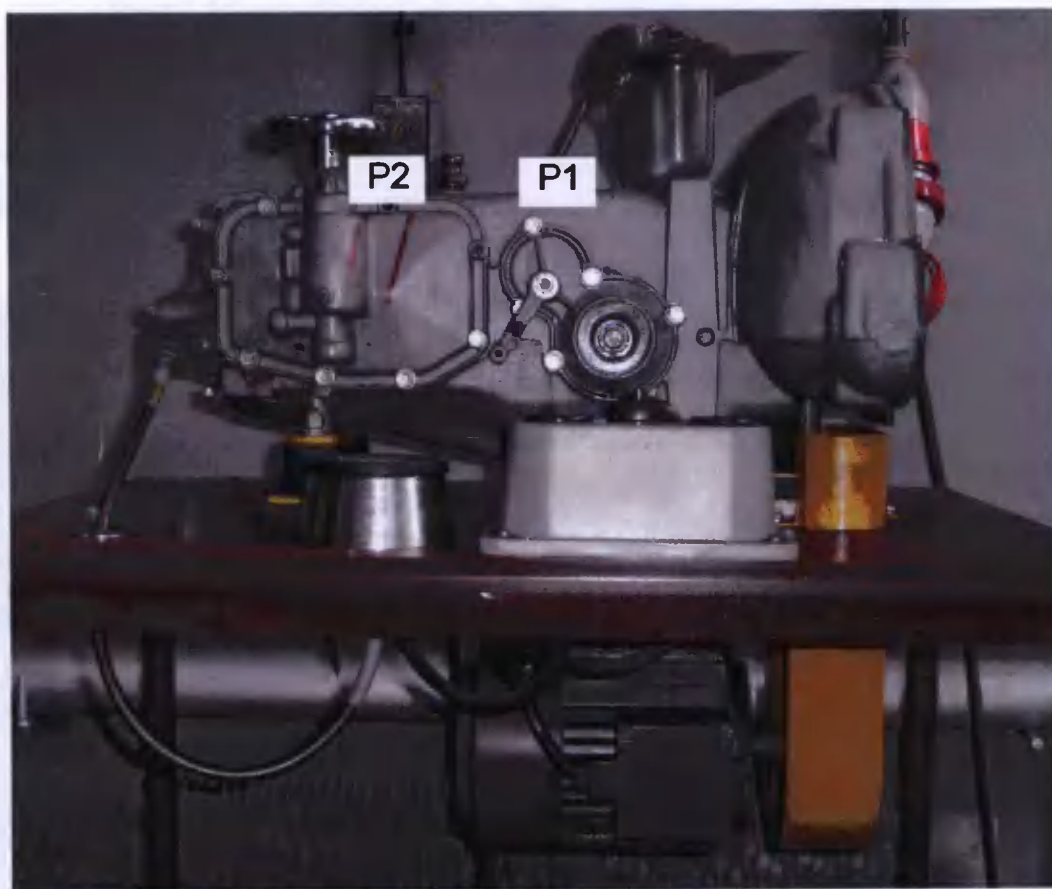
- a) eksperyment czynny – przekładnia zębata samochodowa;
- b) eksperyment bierno-czynny – przekładnia zębata samochodowa, silnik spalinowy samochodu Star 11422.

Badania diagnostyczne tych urządzeń wykonano w warunkach:

- a) laboratoryjnych (stanowiskowych) dla przekładni zębatej samochodowej [128];
- b) eksploatacyjnych dla silników spalinowych samochodów Star11422 [92,128].

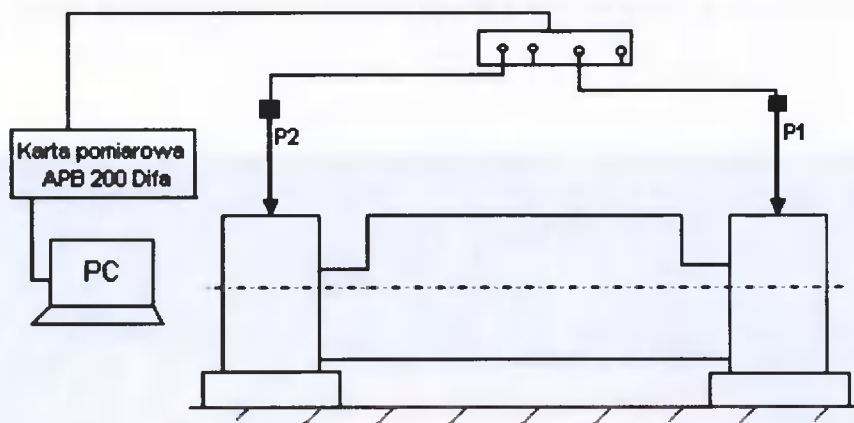
Poniżej zestawiono stanowiska i aparaturę pomiarową do badań diagnostycznych wybranych obiektów w warunkach laboratoryjnych i eksploatacyjnych.

Na rys. 5.1. przedstawiono stanowisko badawcze do pomiaru poziomu drgań przekładni zębatej samochodowej. Jednostką napędową stanowiska jest silnik elektryczny indukcyjny trójfazowy o mocy 1,1kW, napięciu 400V i stałej prędkości obrotowej $n=2780$ obr./min. z przekładnią pasową o przełożeniu 1:2,5. W przekładni zastosowano przełącznik zmiany przełożenia, który umożliwia uzyskiwanie dwóch wyjściowych prędkości obrotowych, odpowiednich dla dwóch prędkości jazdy samochodu: $V_1=30\text{km/h}$, $V_2=60\text{km/h}$.



Rys.5.1. Stanowisko do pomiaru drgań przekładni zębatej samochodowej

Do pomiaru przyspieszeń drgań przekładni zębatej samochodowej wykorzystano układ pomiarowy (rys.5.2).



Rys.5.2. Schemat układu do pomiaru drgań przekładni zębatej samochodowej.
Punkty pomiarowe: P₁ – obudowa-wyście, P₂ – obudowa- wejście

Diagnostyczne badania eksploatacyjne silnika spalinowego samochodu Star 11422 (rys.5.3) obejmowały analizę spalin silnika spalinowego.



Rys.5.3. Stanowisko badawcze samochodu Star 11422

1. Do analizy spalin wykorzystano analizator spalin Lancom (rys.5.4) oraz dymomierz AVL (rys.5.5).



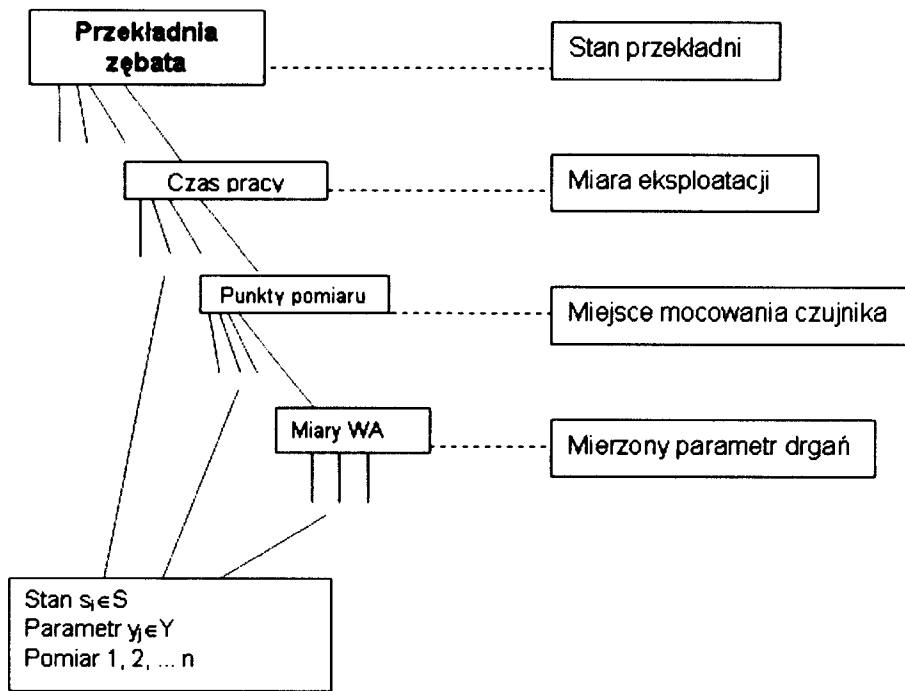
Rys.5.4. Analizator spalin Lancom II firmy LAND Instruments International



Rys.5.5. Dymomierz AVL DISMOKE 4000

5.1.1. Program badań

Poniżej przedstawiono program badań diagnostycznych wybranych obiektów w warunkach laboratoryjnych i eksploatacyjnych. W przypadku przekładni zębatej samochodowej program badań przedstawiono na rys.5.6.



Rys.5.6. Program badań wartości miar procesu drganiowego przekładni zębataj samochodowej

W związku z koniecznością zróżnicowania badań diagnostycznych przekładni zębataj samochodowej (eksperyment czynny – symulacja stanów niezdatności, eksperyment bierny – zużycie uzależnione od przebiegu przekładni, mocowanie czujników drgań) przyjęto umownie dwa przedmioty badań: przekładnia zębata samochodowa nr 1 i przekładnia zębata samochodowa nr 2. Są to [123,128]:

- a) kryteria czasowe okresu pomiędzy poszczególnymi pomiarami: 1 tydzień eksploatacji (8 godzin pracy/dzień) dla przełożenia z prędkością wyjściową V_1 , 1 tydzień eksploatacji (8 godzin pracy/dzień) dla przełożenia z prędkością wyjściową V_2 ;
- b) mierzone wartości: przyspieszenie drgań w czasie;
- c) warunki pomiaru: pomieszczenie laboratoryjne, temperatura pokojowa, wymagana 1 godzina pracy;
- d) pomiar dla przekładni zębataj nr 1: dla minimalnej prędkości obrotowej ($V_1 = 30\text{km/h}$) dla pary kół bez wyłamanego zęba oraz dla maksymalnej prędkości obrotowej ($V_2 = 60\text{km/h}$) dla pary kół z wyłamanym zębem, czujniki pomiarowe mocowane na obudowie skrzyni biegów (P1, P2), niezmiennie w całym okresie badawczym;
- e) pomiar dla przekładni zębataj nr 2: dla minimalnej prędkości obrotowej ($V_1 = 30\text{km/h}$) dla pary kół bez wyłamanego zęba z równoczesnym wprowadzeniem stanu niezdatności (minimalny poziom oleju przekładniowego) oraz dla maksymalnej prędkości obrotowej ($V_2=60\text{km/h}$) dla pary kół z wyłamanym zębem z równoczesnym

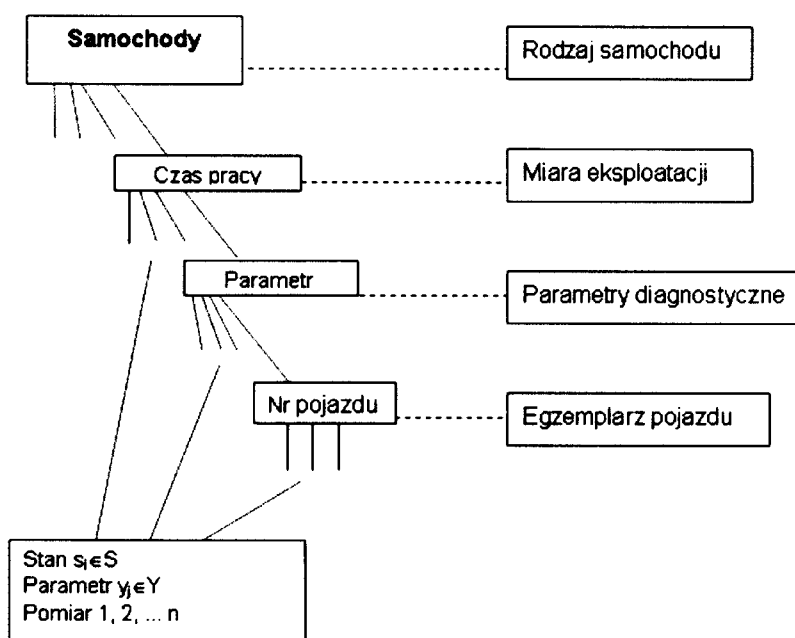
wprowadzeniem stanu niezdatności (minimalny poziom oleju przekładniowego), czujnik pomiarowy mocowany na obudowie skrzyni biegów (P1), niezmiennie w całym okresie badawczym;

f) parametry pomiaru:

- czas pomiaru automatycznie ustawiony przez APB Difa (około 2,5s),
- liczba powtórzeń 10,
- częstotliwość graniczna 200 Hz,
- wyzwolenie pomiaru ręczne,
- odczyt wyników w 10 powtórzeniach co 1 minutę dla zadanych prędkości obrotowych;

f) wyniki pomiarowe w postaci: unv, txt.

Istotę diagnostycznych badań eksploatacyjnych silników samochodów Star 11422 przedstawia rys.5.7.



Rys.5.7. Pogram badań zmian stanu wartości wybranych parametrów diagnostycznych silnika spalinowego samochodów Star 11422

Badania diagnostyczne silników spalinowych samochodów wykonano w warunkach [92,128]:

- objektem badań są silniki spalinowe samochodów Star 11422;
- pomiary dokonywane były średnio co 2500km przebiegu lub co dwa tygodnie eksploatacji pojazdów;
- pomiar – analiza spalin:

- temperatura silnika 80°C,
- obroty biegu jałowego silnika spalinowego $n=600\text{obr/min}$,
- odczyt wartości mierzonych w 10 powtórzeniach co 30 sekund,
- utrzymuje się podwyższone obroty biegu jałowego (2700 obr/min) dla pomiaru zadymienia spalin,
- odczyt wartości mierzonych w 10 powtórzeniach co 30s,
- aparatura: analizator spalin ZS „Lancom”, dymomierz AVL,

Tak opracowany i zrealizowany program badań wybranych obiektów zapewnił uzyskanie zbiorów danych określonych w module „Aktywizacja Danych”, co umożliwi zweryfikowanie algorytmów metodyki genezowania stanu i programu komputerowego „Genezowanie Stanu” w zakresie optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych i genezowania stanu maszyny.

5.1.2. Wyniki badań

Przekładnia zębata samochodowa

Uzyskane wyniki badań przekładni samochodowej określono w postaci szeregów czasowych (zbiory parametrów diagnostycznych w funkcji czasu eksploatacji). Wykaz rozpatrywanych parametrów diagnostycznych i stanów przedstawia tabela 5.1 i 5.2.

Tabela 5.1. Miary procesu drganiowego przekładni zębatej samochodowej dla przekładni samochodowej 1 i przekładni samochodowej 2

Parametry diagnostyczne	
A_{sr} – wartość średnia przyspieszenia	F.Rxx – częstotliwość autokorelacji
RMS(t) – wartość skuteczna po t	A.Rxx – amplituda autokorelacji
RMS(f) – wartość skuteczna po f	Cov.Rxx – kowariancja autokorelacji
RMS(p) – wartość szczytowa RMS	Szum – stosunek sygnału do szumu
Wmax – wartość maksymalna	T.Rxy – czas korelacji wzajemnej
Wmin – wartość minimalna	F.Rxy – częstotliwość korelacji wzajemnej
Kurioza – współczynnik spłaszczenia	A.Rxy – amplituda korelacji wzajemnej
3moment – moment 3 rzędu	Cov.Rxy – kowariancja korelacji wzajemnej
Odch.std – odchylenie standardowe	F.Coher – częstotliwość funkcji koherencji
K_a – współczynnik kształtu dla A	A.Coher – amplituda funkcji koherencji
C_a – współczynnik szczytu dla A	P(A).2std – rozkład amplitudy (2*odchylenie standardowe)
J_a – współczynnik impulsowości dla A	P(A).02std – rozkład amplitudy (0,2*odchylenie standardowe)
h_f – współczynnik luzu	F1.Bspec – częstotliwość f_1 w bispectrum
f_v – częstość Rice'a dla V	F2.Bspec – częstotliwość f_2 w bispectrum
f_x – częstość Rice'a dla X	A.Bspec – amplituda w bispectrum
Hv – współczynnik harmoniczności	A.Bcohe – amplituda w bikoherencji
T.Rxx – czas autokorelacji	W.V(t) – wigner ville dla czasu
	W.V(f) – wigner ville dla częstotliwości

Wyniki badań określono dla czterech obiektów przekładni samochodowej 1, dla których pomiary wykonano dla dwóch prędkości obrotowych przekładni zębatej określonych jako prędkość liniowa samochodu V ($V_1=30\text{km/h}$, $V_2=60\text{km/h}$) oraz dla dwóch czujników umieszczonych w dwóch miejscach (P1, P2) na obudowie łożysk przekładni (PŁ1V1 – P1,V1; PŁ2V1 – P2,V1; PŁ1V2 – P1,V2; PŁ2V2 – P2,V2). Określono także stany przekładni zębatej samochodowej 1 związane z czasem eksploatacji i dwoma prędkościami V_1 i V_2 ($\Theta_1=1000\text{km}$, $\Theta_2=2000\text{km}$, $\Theta_3=3000\text{km}$, $\Theta_4=4000\text{km}$, ..., $\Theta_9 = \Theta(\text{uszkodzenie przekładni zębatej samochodowej})$) – tabela 5.2.

Tabela 5.2. Wykaz obiektów i stanów dla: Przekładnia zębata samochodowa 1

<p>Obiekty: Przekładnia zębata samochodowa 1</p> <p>Ob1 - PŁ1V1 Ob2 - PŁ2V1 Ob3 - PŁ1V2 Ob4 - PŁ2V2</p> <p>Stany dla: Przekładnia zębata samochodowa 1</p> <p>S01 – stan zużycia po 10000 km, V1 S02 – stan zużycia po 20000 km V1 S03 – stan zużycia po 30000 km, V1 S04 – stan zużycia po 40000 km, V1 S05 – stan zużycia po 10000 km, V2 S06 – stan zużycia po 20000 km, V2 S07 – stan zużycia po 30000 km, V2 S08 – stan zużycia po 40000 km, V2</p> <p>Uwagi V1=30km/h, przekładnia bez wylamanego zęba V2=60km/h - przekładnia z wylamanym zębem</p>

Przykładowe wartości szeregów czasowych dla niektórych parametrów diagnostycznych (miar procesu drganiowego – czujnik P1, czujnik P2) wraz z analizą wartości MIN, MAX parametrów diagnostycznych dla przekładni zębatej samochodowej 1 (Obiekt 1) przedstawiono w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Wartości wybranych miar procesu drganiowego dla przekładni zębatej samochodowej 1

Obiekt 1 -PŁ1, V1														
Kod_Obiektu	Czas pracy	Stan	Asr	RMS(t)	RMS(f)	RMS(p)	Wmax	Wmin	Kurtoza	Odch.std	Ka	Ca	Ja	Hf
PŁ1V1	0		0,063	0,080	0,132	0,003	0,250	0,230	3,249	0,080	1,273	3,135	3,992	4,750
PŁ1V1	738,6		0,051	0,064	0,107	0,002	0,234	0,189	2,963	0,062	1,262	3,658	4,615	5,470
PŁ1V1	2953,6		0,048	0,060	0,101	0,002	0,216	0,169	3,015	0,058	1,249	3,630	4,532	5,324
PŁ1V1	3174,6		0,048	0,061	0,104	0,002	0,201	0,180	3,193	0,060	1,265	3,301	4,176	4,979
PŁ1V1	4600,6		0,048	0,062	0,107	0,002	0,270	0,270	3,693	0,062	1,284	4,364	5,602	6,688
PŁ1V1	4640,6		0,050	0,064	0,111	0,002	0,245	0,193	3,441	0,064	1,279	3,833	4,903	5,835
PŁ1V1	5484,6		0,052	0,067	0,114	0,003	0,217	0,206	3,278	0,067	1,279	3,257	4,164	4,969
PŁ1V1	5551,6		0,062	0,079	0,120	0,003	0,260	0,260	3,243	0,079	1,277	3,292	4,205	5,034
PŁ1V1	6876,6		0,077	0,101	0,146	0,002	0,398	0,375	3,752	0,100	1,301	3,960	5,151	6,210
PŁ1V1	11516,6	S01	0,207	0,276	0,465	0,089	0,984	0,683	3,301	0,276	1,334	3,562	4,750	5,992
PŁ1V1	20231,6	S02	0,224	0,296	0,521	0,117	0,910	0,690	2,993	0,297	1,322	3,070	4,059	5,113
PŁ1V1	33082,6	S03	0,193	0,253	0,436	0,083	0,804	0,661	3,048	0,253	1,310	3,171	4,153	5,158
PŁ1V1	34813,6		0,193	0,254	0,435	0,083	0,761	0,761	3,003	0,253	1,313	2,997	3,934	4,914
PŁ1V1	37819,6		0,226	0,292	0,492	0,105	0,932	0,723	3,060	0,292	1,294	3,187	4,124	5,051
PŁ1V1	37868,6		0,226	0,297	0,505	0,108	0,902	0,774	3,123	0,297	1,315	3,039	3,996	4,968
PŁ1V1	38813,6		0,186	0,252	0,433	0,079	0,766	0,686	3,252	0,252	1,357	3,035	4,120	5,309
PŁ1V1	39553,6		0,192	0,260	0,448	0,084	0,867	0,727	3,305	0,260	1,358	3,331	4,523	5,804
PŁ1V1	40628,6	S04	0,192	0,257	0,451	0,085	0,796	0,683	3,273	0,257	1,344	3,092	4,155	5,266
PŁ1V1	40748,6		0,181	0,234	0,404	0,067	0,698	0,661	2,887	0,234	1,294	2,988	3,866	4,738
PŁ1V1	41383,6		0,182	0,237	0,404	0,065	0,858	0,685	3,087	0,237	1,302	3,617	4,709	5,812
Analiza wartości max i min														
			Asr	RMS(t)	RMS(f)	RMS(p)	Wmax	Wmin	Kurtoza	Odch.std	Ka	Ca	Ja	Hf
MIN			0,03	0,045	0,078	0,00073	0,15	0,11	2,2	0,04	1,16	2,3	2,7	3,1
MAX			0,25	0,31	0,54	0,13	0,999	0,8	4,8	0,31	1,42	5,5	7,2	8,6

W przypadku przekładni samochodowej 2 wyniki badań określono dla dwóch obiektów, dla których pomiary wykonano przy dwóch prędkościach obrotowych przekładni zębatej określonych jako prędkość liniowa samochodu V ($V_1=30\text{km/h}$, $V_2=60\text{km/h}$) i jednego czujnika umieszczonego w P1: PŁV1 – P1,V1; PŁV2 – P1,V2. Określono także stany przekładni zębatej samochodowej 2 dla V1 i z przebiegiem przekładni (S10) i z obniżonym poziomem oleju (S11) oraz dla V2 i z przebiegiem przekładni (S30) i z obniżonym poziomem oleju (S31) – tabela 5.4.

Przykładowe wartości szeregów czasowych dla niektórych parametrów diagnostycznych (miar procesu drganiowego – czujnik P1) wraz z opisem stanów niezdatności i analizą wartości MIN, MAX parametrów diagnostycznych dla przekładni zębatej samochodowej 2 (Obiekt 1, Obiekt 2) przedstawiono w tabeli 5.5.

Tabela 5.4. Wykaz obiektów i stanów dla: Przekładnia zębata samochodowa 2

Obiekty: Przekładnia zębata samochodowa 2
 Ob1 – PŁV1
 Ob2 – PŁV2
Stany dla: Przekładnia zębata samochodowa
 S10 – stan niezdatności, V1
 S11 – stan niezdatności: minimalny poziom oleju, V1
 S30- stan niezdatności, V2
 S31 – stan niezdatności, minimalny poziom oleju, V2
Uwagi
 V1=30km/h, przekładnia bez wyłamanego zęba
 V2=60km/h - przekładnia z wyłamanym zębem

Tabela 5.5. Wartości wybranych miar procesu drganiowego dla: Przekładnia zębata samochodowa 2

Przekładnia samochodowa 2														
Obiekt 1														
Kod_Obiektu	Czas pracy	Stan	Asr	RMS(t)	RMS(f)	RMS(p)	Wmax	Wmin	Kurtoza	Odch.std	Ka	Ca	Ja	Hf
PŁV1	8	S10	0,149	0,175	0,302	0,046	0,414	0,306	2,444	0,175	1,174	2,363	2,776	3,109
PŁV1	16	S10	0,071	0,089	0,154	0,012	0,251	0,251	2,627	0,088	1,246	2,833	3,530	4,163
PŁV1	24	S10	0,069	0,082	0,143	0,010	0,205	0,205	2,215	0,082	1,195	2,505	2,994	3,425
PŁV1	32	S10	0,055	0,066	0,115	0,006	0,170	0,170	2,277	0,065	1,203	2,555	3,075	3,530
PŁV1	40	S10	0,080	0,094	0,163	0,014	0,238	0,193	2,201	0,093	1,168	2,532	2,958	3,324
PŁV1	48	S11	0,124	0,141	0,245	0,039	0,289	0,289	1,694	0,140	1,130	2,054	2,322	2,563
PŁV1	56	S10	0,084	0,100	0,171	0,013	0,220	0,220	1,978	0,099	1,189	2,211	2,630	3,017
PŁV1	64	S10	0,104	0,124	0,215	0,024	0,280	0,280	2,126	0,124	1,191	2,253	2,683	3,078
PŁV1	72	S10	0,128	0,147	0,256	0,040	0,298	0,271	1,834	0,146	1,145	2,030	2,324	2,586
PŁV1	80	S11	0,086	0,099	0,172	0,016	0,216	0,197	1,846	0,098	1,143	2,187	2,499	2,774
PŁV1	88	S10	0,049	0,059	0,102	0,005	0,167	0,167	2,444	0,059	1,217	2,816	3,427	3,976
PŁV1	92	S11	0,074	0,088	0,150	0,012	0,238	0,238	2,174	0,088	1,184	2,708	3,207	3,639
Obiekt 2														
Kod_Obiektu	Czas pracy	Stan	Asr	RMS(t)	RMS(f)	RMS(p)	Wmax	Wmin	Kurtoza	Odch.std	Ka	Ca	Ja	Hf
PŁV2	8	S30	0,031	0,038	0,064	0,001	0,129	0,098	2,743	0,037	1,228	3,447	4,232	4,910
PŁV2	16	S30	0,045	0,054	0,095	0,004	0,141	0,113	2,249	0,054	1,203	2,598	3,125	3,606
PŁV2	24	S30	0,045	0,054	0,095	0,004	0,141	0,113	2,249	0,054	1,203	2,598	3,125	3,606
PŁV2	32	S30	0,048	0,058	0,101	0,004	0,156	0,117	2,162	0,057	1,204	2,688	3,236	3,733
PŁV2	40	S30	0,027	0,034	0,058	0,001	0,098	0,092	2,671	0,034	1,254	2,892	3,628	4,301
PŁV2	48	S31	0,036	0,045	0,079	0,002	0,141	0,107	2,615	0,044	1,226	3,151	3,864	4,534
PŁV2	56	S30	0,056	0,070	0,120	0,006	0,178	0,178	2,454	0,069	1,241	2,564	3,182	3,751
PŁV2	64	S30	0,044	0,055	0,092	0,003	0,172	0,157	2,808	0,055	1,244	3,140	3,905	4,595
PŁV2	72	S30	0,034	0,041	0,073	0,003	0,116	0,104	2,180	0,039	1,192	2,822	3,363	3,860
PŁV2	80	S31	0,027	0,033	0,057	0,001	0,096	0,096	2,684	0,032	1,204	2,942	3,542	4,072
PŁV2	88	S30	0,037	0,045	0,077	0,002	0,113	0,106	2,539	0,044	1,189	2,532	3,009	3,434
PŁV2	92	S31	0,020	0,025	0,043	0,001	0,080	0,080	2,719	0,024	1,273	3,156	4,017	4,812
Analiza wartości max i min														
			Asr	RMS(t)	RMS(f)	RMS(p)	Wmax	Wmin	Kurtoza	Odch.std	Ka	Ca	Ja	Hf
MIN			0,018	0,023	0,038	0,000	0,072	0,072	1,524	0,022	1,017	1,827	2,090	2,307
MAX			0,164	0,193	0,333	0,051	0,456	0,336	3,088	0,192	1,400	3,791	4,655	5,401

Silnik spalinowy samochodu STAR 11422

Uzyskane wyniki badań analizy spalin silników spalinowych samochodów STAR określono w postaci szeregów czasowych (zbiory parametrów diagnostycznych w funkcji czasu eksploatacji). Wykaz rozpatrywanych parametrów diagnostycznych przedstawia tabela 5.6.

Tabela 5.6. Parametry diagnostyczne analizy spalin

Parametry diagnostyczne
CO - tlenek węgla [ppm]
CO ₂ – dwutlenek węgla [ppm]
NO – tlenek azotu [ppm]
NO ₂ – dwutlenek azotu [ppm]
NO _x – tlenki azotu [ppm]
C _x H _x – węglowodory [ppm]
Dym – zadymienie [1/m]

Dla samochodów Star 11422 określono także stany związane z przebiegiem silników spalinowych (tabela 5.7).

Tabela 5.7. Wykaz obiektów i stanów dla samochodów Star 11422

Obiekty grupy: Samochody Star 11422	Stany
Ob1 – S11422_1	S77 – stan zużycia po 70000km
Ob2 – S11422_2	S78 – stan zużycia po 80000km
Ob3 – S11422_3	S79 – stan zużycia po 90000km
Ob4 – S11422_4	S80 – stan zużycia po 100000km
Ob5 – S11422_5	S81 – stan zużycia po 110000km
Ob6 – S11422_6	S82 – stan zużycia po 120000km
Ob7 – S11422_7	S83 – stan zużycia po 130000km
Ob8 – S11422_8	
Ob9 – S11422_9	
Ob10 – S11422_10	

Przykładowe wartości szeregów czasowych dla parametrów diagnostycznych wraz z wartościami MIN, MAX parametrów diagnostycznych dla: Samochody Star 11422 (Obiekt 1, Obiekt 2) przedstawiono w tabeli 5.8.

Tabela 5.8. Wartości parametrów diagnostycznych dla: Samochody Star 11422

Obiekt 1 – S11422_3									
Kod_Obiektu	Czas pracy	Stan	CO	CO2	NO	NO2	NOx	CxHx	Dym
S11422_1	86385		165,400	2,081	181,700	57,033	238,733	0,022	0,820
S11422_1	87026		126,267	1,510	169,267	40,367	209,633	0,028	0,920
S11422_1	87617		131,167	1,540	171,200	40,267	211,467	0,057	0,810
S11422_1	89760		117,700	1,549	166,600	42,700	209,300	0,115	0,950
S11422_1	92075	S79	104,567	1,477	149,567	40,100	189,667	0,075	0,880
S11422_1	94370		115,133	1,402	171,167	39,700	210,867	3,039	0,910
S11422_1	96952		112,400	1,302	161,267	36,633	197,900	2,479	0,930
S11422_1	99265		252,333	1,394	184,567	38,000	182,567	2,506	1,390
S11422_1	106145	S80	120,033	1,695	172,667	36,000	228,667	2,654	1,580
S11422_1	108200		116,000	1,502	143,867	32,000	175,867	1,092	1,350
S11422_1	109074		150,167	1,680	183,967	41,900	225,867	1,035	1,690
S11422_1	110086	S81	116,467	1,460	167,067	32,433	199,500	1,513	1,040
S11422_1	111110		184,533	1,434	171,000	27,667	198,667	2,311	1,080
S11422_1	112000		220,600	1,512	160,867	27,000	187,867	1,025	1,070
S11422_1	112623		214,233	1,385	151,667	22,000	173,667	1,911	1,040
Obiekt 2 – S11422_5									
Kod_Obiektu	Czas pracy	Stan	CO	CO2	NO	NO2	NOx	CxHx	Dym
S11422_2	85640		156,828	2,011	164,172	45,586	209,759	0,019	1,120
S11422_2	86615		168,533	1,672	158,033	43,500	201,533	0,056	1,230
S11422_2	87450		160,267	1,765	160,933	42,233	203,167	0,026	1,240
S11422_2	90380	S79	115,067	1,653	146,600	40,000	186,600	0,118	1,340
S11422_2	93125		126,367	1,635	139,433	37,900	177,333	0,070	1,220
S11422_2	95930		120,600	1,458	155,567	41,333	196,900	1,065	1,420
S11422_2	99930		144,000	1,379	157,167	37,333	194,500	1,356	1,520
S11422_2	102947	S80	241,600	1,528	146,867	40,833	187,700	1,687	1,130
S11422_2	110822	S81	277,600	1,732	127,800	51,000	168,800	1,375	1,360
S11422_2	111710		210,633	1,628	166,300	32,833	199,133	1,301	1,240
S11422_2	112833		219,767	1,559	147,433	35,000	182,433	1,879	1,190
S11422_2	114295		219,600	1,526	138,167	29,700	167,867	1,731	1,460
S11422_2	116083		209,667	1,560	148,233	33,000	181,233	1,453	1,480
S11422_2	117465		201,633	1,551	154,667	27,000	181,667	1,960	1,340
S11422_2	118695		230,233	1,607	135,733	31,000	186,733	1,888	1,750
S11422_2	119525		215,800	1,314	121,000	15,667	136,667	2,346	1,760
Analiza wartości max i min									
			CO	CO2	NO	NO2	NOx	CxHx	Dym
MAX			320	2,5	240	75	250	4,6	4
MIN			100	1	100	15	70	0,01	0,4

Reasumując rozpatrzone w rozdziale zagadnienia dotyczące przeprowadzonych badań stanowiskowych (przekładnia zębata samochodowa 1 i przekładnia zębata samochodowa 2) oraz badań eksploatacyjnych (silniki spalinowe samochodu Star 11422) stwierdza się, że:

1. Po przeprowadzeniu badań stanowiskowych przekładni zębatej samochodowej:

- a) uzyskano zbiory wartości parametrów diagnostycznych: 35 miar procesu drganiowego w funkcji czasu eksploatacji przekładni 1 – (0-41383)km oraz 35 miar procesu drganiowego) w funkcji czasu eksploatacji przekładni 2 oraz symulowanych stanów niezdatności S11 i S31;
- b) określono stany przekładni zębatej 1 związane z czasem jej eksploatacji – (S05-S09);
- c) określono stany przekładni zębatej 2 związane z czasem jej eksploatacji i symulowanymi stanami niezdatności – (S10, S11, S30, S31);
- d) w związku z niemożliwością wyznaczenia wartości granicznej parametrów diagnostycznych dla przekładni zębatej samochodowej określono wartości graniczne parametrów diagnostycznych jako: $y_{jgrd} = MIN(y_j) - 0,1MIN(y_j)$ i $y_{jgrd} = MAX(y_j) + 0,1MAX(y_j)$;
- e) uzyskano cztery obiekty przekładnia zębatej samochodowej 1, związane z punktem pomiarowym procesu drganiowego (P1, P2) oraz prędkością wyjściową przekładni (V_1, V_2);
- f) uzyskano dwa obiekty przekładni zębatej samochodowej 2, związane z punktem pomiarowym procesu drganiowego (P1) oraz prędkością wyjściową przekładni (V_1, V_2).

2. Po przeprowadzeniu badań eksploatacyjnych silników spalinowych samochodów Star11422:

- a) uzyskano zbiory wartości parametrów diagnostycznych (7 miar zawartości składników toksycznych w spalinach) w funkcji czasu eksploatacji samochodów – (63043-117920)km;
- b) określono stany silników spalinowych związane z czasem ich eksploatacji – (S77-S83);
- c) w związku z niemożliwością wyznaczenia wartości granicznej parametrów diagnostycznych dla silników spalinowych samochodów Star 11422 określono wartości graniczne parametrów diagnostycznych jako: $y_{jgrd} = MIN(y_j) - 0,1MIN(y_j)$ i $y_{jgrd} = MAX(y_j) + 0,1MAX(y_j)$;
- d) uzyskano dziesięć obiektów grupy: Star11422 związane z egzemplarzem samochodu;

3. Określone powyżej dane stanowią będą dane wejściowe do badań procedur metodyki genezowania stanu maszyn.

5.2. Badanie procedur metodyki genezowania stanu

5.2.1. Charakterystyka badań

Badania procedur metodyki realizowane są przy pomocy programu „Genezowanie Stanu”. Zakres realizowanych funkcji obejmuje badanie procedur metodyki genezowania stanu dla:

- a) przekładni zębatej samochodowej 1;
- b) przekładni zębatej samochodowej 2;
- c) silników spalinowych samochodów Star1 1422.

Badania dotyczą wyznaczenia:

- a) optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych do genezowania stanu;
- b) elementów składowych metodyki genezowania stanu:
 - metody genezowania wartości parametru diagnostycznego według funkcji błędu genezy,
 - badanie sposobu szacowania przyczyny stanu niezdatności na podstawie wartości genezowanej parametrów diagnostycznych.

Przedstawione powyżej czynności, które realizują zadania metodyki genezowania stanu maszyn, zaimplementowane są w programie komputerowym „Genezowanie Stanu”. Są to:

1. Pozyskanie danych pomiarowych dla maszyn w postaci:

- a) wartości parametrów diagnostycznych w trakcie realizacji eksperymentu bierno – czynnego lub biernego;
- b) symulowanych stanów maszyn (eksperyment czynny), zaobserwowanych w czasie eksploatacji maszyny (eksperyment bierno – czynny).

Dane te zostały określone, na podstawie badań stanowiskowych (samochodowa przekładnia zębata 1 i samochodowa przekładnia zębata 2) oraz badań eksploatacyjnych (silniki samochodów Star 11422), w postaci szeregów czasowych opisanych w rozdziale 5.1 opracowania. Przykładowe dane wartości szeregów czasowych wraz opisem stanów i analizą wartości MIN, MAX parametrów diagnostycznych dla odpowiednich grup przedstawiono w podrozdziale 5.1;

2. Optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych dla każdej grup maszyn zawiera wyznaczenie optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych z wagami według metodyki przedstawionej w rozdziale 4 opracowania.

3. Genezowanie stanu maszyny dla każdej z grup maszyn zawiera określenie zbioru metod genezowania wartości parametrów diagnostycznych i sposobu szacowania przyczyny zaistnienia stanu niezdatności w chwili badania maszyny według metodyki przedstawionej w rozdziale 4:

- a) wyznaczenie wartości genezowanej parametrów diagnostycznych wraz z błędem genezy;
- b) badanie sposobu określenia przyczyny zaistnienia stanu niezdatności w chwili badania maszyny Θ_b poprzez:
 - określenie odległości wartości genezowanej parametru diagnostycznego z błędem genezy od wartości granicznej (wartości MIN, MAX parametrów diagnostycznych),
 - określenie odległości minimalnej od wartości granicznej d_{\min} dla stanów niezdatności związanych z czasem pracy obiektu (S01, S02, S03, S04) i silników samochodów Star 11422 (S77, S78, S79, S80, S81, S82, S83) oraz symulowanych stanów przekładni zębatej 2 (S10, S11, S30, S31),
 - rozpatrzenie przyczyny stanu $s_i(T_{LU})$ przez badanie okoliczności wystąpienia odległości minimalnej d_{\min} dla analizowanych stanów $s_i \in \{s(\Theta)\}$ w kontekście chwilowego wystąpienia stanu s_i w przeszłości oraz warunków jego wystąpienia (obciążenie, warunki terenowe, warunki klimatyczne, inne).

W wyniku badań metodyki genezowania stanu powinny zostać określone przesłanki do wygenerowania, dedykowanych odpowiednim grupom maszyn, reguł wnioskowania niezbędnych przy projektowaniu, wykonaniu i wdrożeniu oprogramowania systemu rozpoznawania stanu maszyny.

5.2.2. Analiza wyników badań

Przekładnia zębata samochodowa 1

Parametry diagnostyczne

Badanie metodyki genezowania stanu w zakresie wyznaczenia zbioru parametrów diagnostycznych realizowano na podstawie:

1. Wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych według metodyki przedstawionej w rozdziale 4 opracowania. Dla zbioru danych (tabela 5.1) uzyskano zbiór parametrów diagnostycznych z odpowiednimi wartościami wagi, które przykładowo dla obiektu PŁ1V1 przedstawiono w tabeli 5.9.

Tab. 5.9. Zbiór parametrów diagnostycznych dla obiektu PŁ1V1

Zbiór Parametrów Diagnostycznych dla PŁ1V1								
KOD PARAM	NAZWA PARAM	KOD OB	NAZWA OB	JEDN	RJ	HJ	DJI	W1J
Wmin	Wartość min	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,90549	0,81991	0,01	0,44521
A.Rxx	Amplituda autokorelacji	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,89244	0,79644	0,03205	0,13891
RMS(f)	Wartość skuteczna po f	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,86791	0,75326	0,09127	0,04878
RMS(t)	Wartość skuteczna po t	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,8652	0,74857	0,09772	0,04556
Asr	Wartość średnia	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,86518	0,74854	0,09777	0,04554
Odch.std	Odchylenie standardowe	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,86504	0,7483	0,0981	0,04538
Wmax	Wartość max	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,83923	0,7043	0,15886	0,02803
Cov.Rxx	Kowariancja autokorelacji	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,83148	0,69136	0,17682	0,02518
RMS(p)	Wartość szczytowa RMS	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,83041	0,68959	0,17927	0,02483
Szum	Stosunek do sygnału do szumu	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,82209	0,67584	0,19839	0,02244
A.Rxy	Amplituda korelacji wzajemnej	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,77383	0,59881	0,30637	0,01453
A.Bspec	Amplituda w bispectrum	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,75934	0,5766	0,3378	0,01318
Fv	Częstość Ricea dla V	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,73281	0,53702	0,39422	0,01129
Fx	Częstość Ricea dla X	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,72903	0,53149	0,40215	0,01107
Ka	Wsp. Kształtu	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,70846	0,50192	0,44471	0,01001
Hv	Wsp. Harmoniczności	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,69653	0,48515	0,46899	0,00949
P(A).02std	Rozkład amplitudy 02odch.std	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,58298	0,33986	0,68531	0,0065
Ca	Wsp.szczytu	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,54682	0,29902	0,74867	0,00595
Ja	Wsp. Impulsowości	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,41915	0,17568	0,95176	0,00468
Kurioza	Współczynnik spłaszczenia	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,37469	0,14039	1,01513	0,00439
A.Coher	Amplituda funkcji koherencji	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,37352	0,13952	1,01675	0,00438
A.Bcohe	Amplituda w bikoherencji	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,37166	0,13813	1,01932	0,00437
F.Rxx	Częstotliwość autokorelacji	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,36245	0,13137	1,03194	0,00431
W.V(f)	Wigner ville dla częstotliwości	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,34194	0,11693	1,05946	0,0042
T.Rxx	Czas autokorelacji	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,30483	0,09292	1,10735	0,00402
F.Rxy	Częstotliwość autokorelacji	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,29074	0,08453	1,12489	0,00396
Hf	Wsp. Luzu	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,2117	0,04482	1,21685	0,00366
W.V(t)	Wigner ville dla czasu	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,20403	0,04163	1,22522	0,00363
F.Coher	Częstotliwość funkcji koherencji	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,08328	0,00694	1,3445	0,00331
P(A).2std	Rozkład amplitudy 2 odch.std	PŁ1V1	Ł1V1	km	0,03358	0,00113	1,38725	0,00321

Analiza wyników dla obiektu PŁ1V1 wykazała, że:

- najwyższe wartości wagi w_{1j} (kolor żółty) posiadają parametry diagnostyczne (Wmin, A.Rxx, RMS(f), RMS(t), Asr, Odch.std), najmniejsze zaś parametry diagnostyczne (W.V(t), F.Coher, P(A).2std);
- w celu optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych dla obiektu PŁ1V1 (ilość parametrów, wartość wagi w_{1j}) proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{1j} \geq 0,04$ (uzyskuje się zbiór 6 elementowy).

Analiza wyników dla pozostałych obiektów grupy: Przekładnia zębata samochodowa 1 wykazała, że:

- a) najwyższe i najniższe wartości wagi w_{ij} posiadają różne parametry diagnostyczne:
 - dla obiektu PŁ1V2 wartości najwyższe (f_x , f_v , Szum, A.Rxy, A.Rxx) proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq 0,04$ (uzyskuje się zbiór 5 elementowy) oraz wartości najniższe: Ja, F.Coher, Ca,
 - dla obiektu PŁ2V1 wartości najwyższe: RMS(p), Odch.std, RMS(t), Cov.Rxx, RMS(f) (proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq 0,1$ – uzyskuje się zbiór 5 elementowy) oraz wartości najniższe: W.V(t), A.BCohe, T.Rxx,
 - dla obiektu PŁ2V2 wartości najwyższe: f_x , f_v , Szum, Ka, T.Rxx (proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq 0,02$ (uzyskuje się zbiór 5 elementowy) oraz wartości najniższe: P(A).0,2std, F.Rxy, A.BCohe;
- c) w celu optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych dla obiektów grupy: Przekładnia zębata samochodowa 1 (ilość parametrów, wartość wagi w_{ij}) proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartości wagi $w_{ij} \geq 0,1$;
- d) przyjęte kryteria optymalizacji jednoznacznie identyfikują zbiory wartości parametrów posiadających największą ilość informacji o stanie technicznym i zmiennych w czasie eksploatacji przekładni zębatej samochodowej 1.

Reasumując przeprowadzone badania metodyki genezowania stanu w zakresie „Parametry diagnostyczne” dla grupy: Przekładnia zębata samochodowa 1 stwierdza się, że:

- a) w metodyce genezowania stanu maszyn proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq 0,1$ (np. dla PŁ1V1: Wmin, A.Rxx,) i odpowiadającej jej liczebności zbioru;
- b) proponuje się także rozpatrzyć rozwiązanie alternatywne, tzn. zbiór parametrów diagnostycznych jednoelementowy, dla którego waga w_{ij} przyjmuje wartość maksymalną (np. dla PŁ1V1: Wmin).

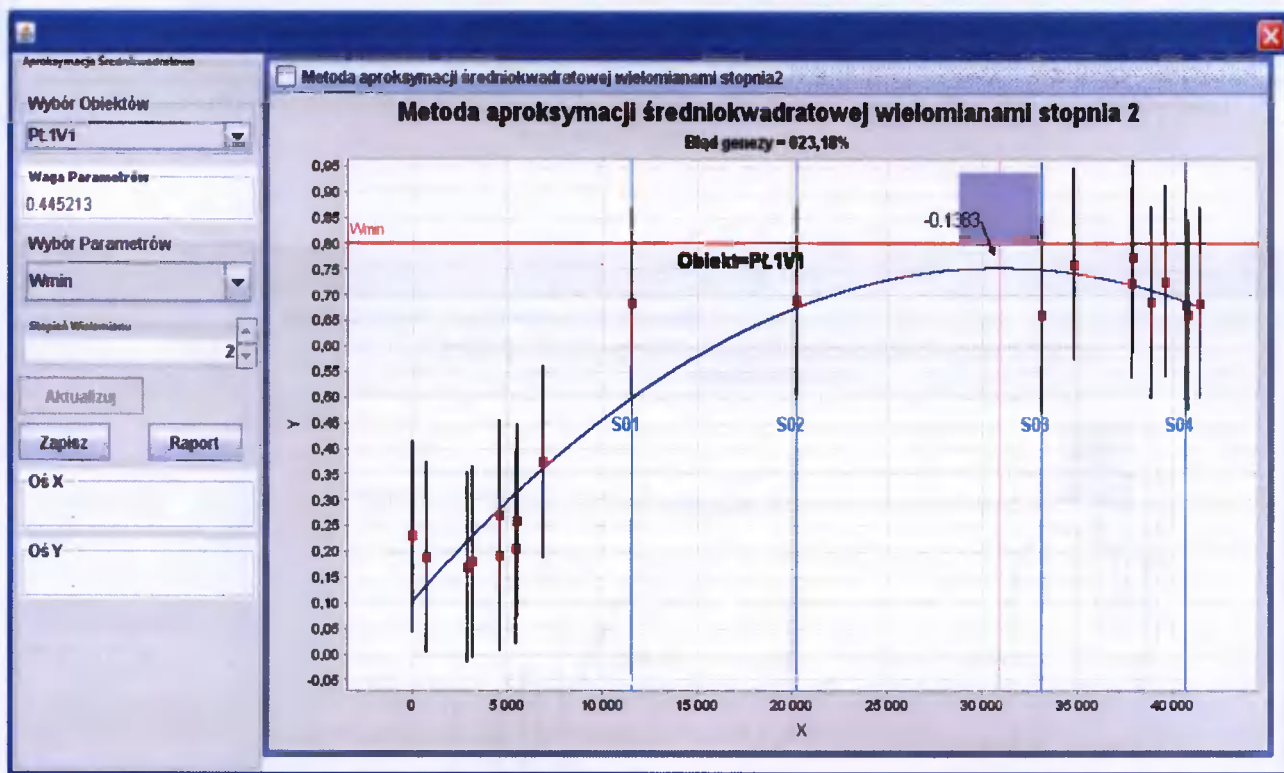
Genezowanie stanu

Badanie metodyki genezowania stanu dla przekładni zębatej samochodowej 1 w aspekcie wyznaczenia metody genezowania wartości parametru diagnostycznego według funkcji błędu genezy oraz badanie sposobu szacowania przyczyny stanu niezdatności na

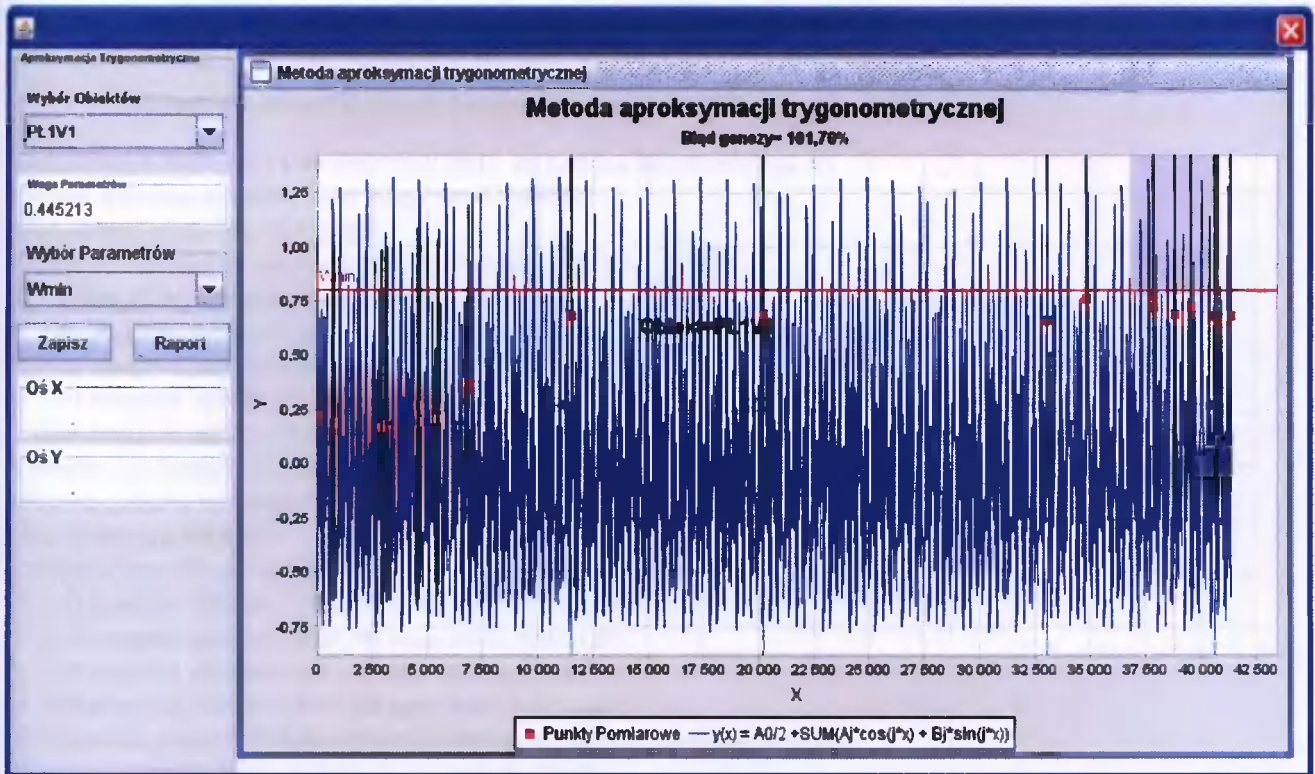
podstawie odległości wartości genezowanej parametru diagnostycznego od wartości granicznej realizowano na podstawie:

1. Określenia zbioru metod genezowania wartości parametrów diagnostycznych i sposobu szacowania przyczyny zaistnienia stanu niezdatności w chwili badania maszyny według metodyki przedstawionej w rozdziale 4 opracowania. Dla zbioru parametrów diagnostycznych (tabela 5.9) uzyskano wizualizację zmian wartości wybranych parametrów diagnostycznych w funkcji przyjętego czasu pracy dla analizowanych metod aproksymacji i interpolacji. Przykładowe wizualizacje dla obiektu PŁ1V1 i parametru Wmin przedstawiono na rys. 5.8, 5.9, 5.10, 5.11.

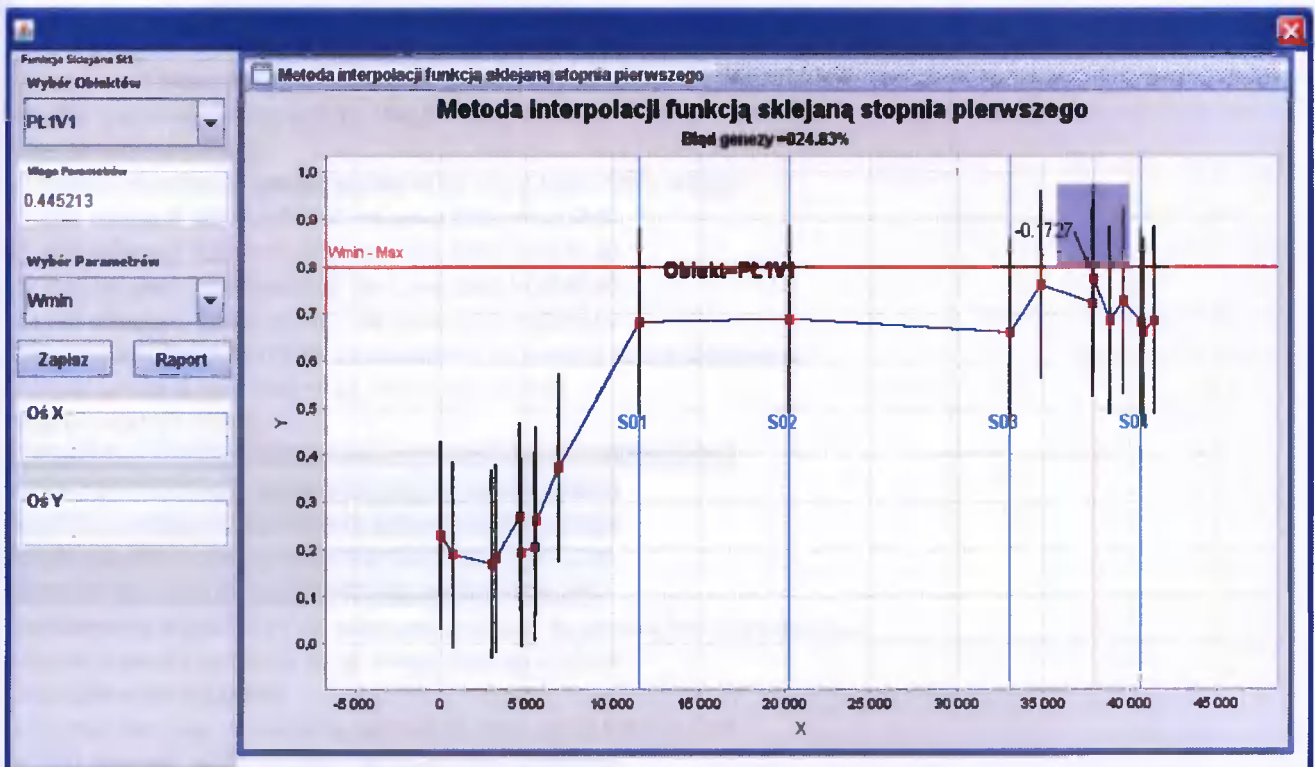
Dane umożliwiające analizę wartości parametrów diagnostycznych w celu szacowania korelacji stan maszyny – wartość funkcji parametrów diagnostycznych dla obiektu PŁ1V1 przedstawiono w tabeli 5.10.



Rys.5.8. Wizualizacja wyznaczenia wartości genezowanej parametru Wmin (waga $w_1=0,4452$) dla aproksymacji średniokwadratowej stopnia 2



Rys.5.9. Wizualizacja wyznaczenia wartości genezowanej parametru Wmin (waga $w_1=0,4452$) dla aproksymacji trygonometrycznej



Rys.5.10. Wizualizacja wyznaczenia wartości genezowanej parametru Wmin (waga $w_1=0,4452$) dla interpolacji funkcją sklejaną stopnia 1

Tabela 5.10. Dane umożliwiające analizę wartości genelowanych parametrów diagnostycznych (metoda interpolacji stopnia 3) dla obiektu PŁ1V1.

Genelowanie Stanu z wykorzystaniem funkcji skleianej St3

Genelowanie Stanu PŁ1V1 dla parametru Wmin za pomocą funkcji skleianej st3

Wartość graniczna parametru =0.80, Waga Wmin = 0.4452

Błąd genezy Vg =0.1563, Vg =19.53%

Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 15311.360 = -0.2821

Dla obiektu PŁ1V1 występują następujące stany:

- 1 : S01 odległość d(S01)=-0.039 dla czasu t(S01)=11516.60
- 2 : S02 odległość d(S02)=-0.046 dla czasu t(S02)=20231.60
- 3 : S03 odległość d(S03)=-0.0172 dla czasu t(S03)=33082.60
- 4 : S04 odległość d(S04)=-0.0388 dla czasu t(S04)=40628.60

Genelowanie Stanu PŁ1V1 dla parametru A.Rxx za pomocą funkcji skleianej st3

Wartość graniczna parametru =0.16, Waga A.Rxx = 0.1389

Błąd genezy Vg =42.87%

Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 36924.433 = -0.1171

- 1 : S01 odległość d(S01)=-0.0125 dla czasu t(S01)=11516.60
- 2 : S02 odległość d(S02)=-0.0297 dla czasu t(S02)=20231.60
- 3 : S03 odległość d(S03)=-0.005 dla czasu t(S03)=33082.60
- 4 : S04 odległość d(S04)=-0.0397 dla czasu t(S04)=40628.60

Genelowanie Stanu PŁ1V1 dla parametru RMS(f) za pomocą funkcji skleianej st3

Wartość graniczna parametru =0.60, Waga RMS(f) = 0.0488

Błąd genezy Vg =26.43%

Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 15632.466 = -0.1579

- 1 : S01 odległość d(S01)=-0.0231 dla czasu t(S01)=11516.60
- 2 : S02 odległość d(S02)=-0.0791 dla czasu t(S02)=20231.60
- 3 : S03 odległość d(S03)=0.0051 dla czasu t(S03)=33082.60
- 4 : S04 odległość d(S04)=-0.0094 dla czasu t(S04)=40628.60

Genelowanie Stanu PŁ1V1 dla parametru RMS(t) za pomocą funkcji skleianej st3

Wartość graniczna parametru =0.30, Waga RMS(t) = 0.0456

Błąd genezy Vg =19.66%

Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 15220.520 = -0.1285

- 1 : S01 odległość d(S01)=-0.0351 dla czasu t(S01)=11516.60
- 2 : S02 odległość d(S02)=-0.0555 dla czasu t(S02)=20231.60
- 3 : S03 odległość d(S03)=-0.0124 dla czasu t(S03)=33082.60
- 4 : S04 odległość d(S04)=-0.0164 dla czasu t(S04)=40628.60

Genelowanie Stanu PŁ1V1 dla parametru Asr za pomocą funkcji skleianej st3

Wartość graniczna parametru =0.24, Waga Asr = 0.0455

Błąd genezy Vg =17.75%

Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 15185.920 = -0.0797

- 1 : S01 odległość d(S01)=-0.0097 dla czasu t(S01)=11516.60
- 2 : S02 odległość d(S02)=-0.0258 dla czasu t(S02)=20231.60
- 3 : S03 odległość d(S03)=0.0039 dla czasu t(S03)=33082.60
- 4 : S04 odległość d(S04)=0.0058 dla czasu t(S04)=40628.60

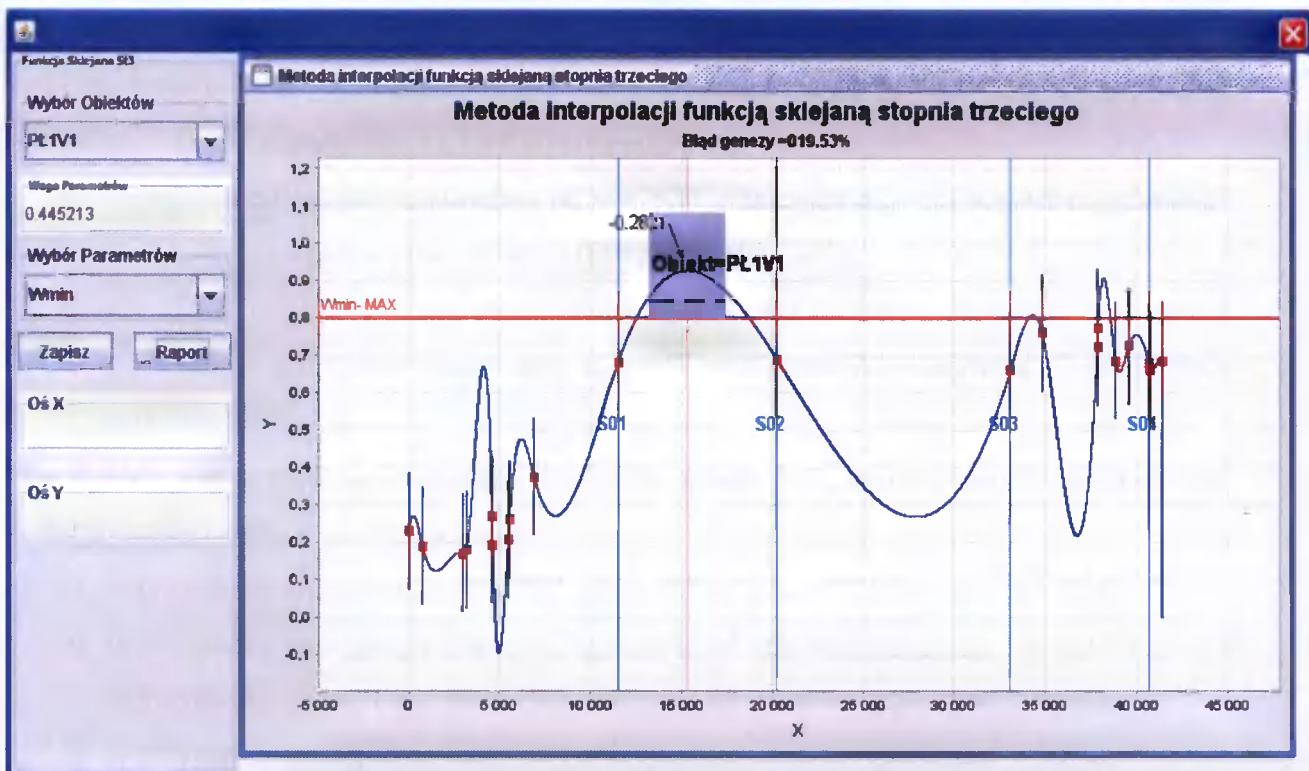
Genelowanie Stanu PŁ1V1 dla parametru Odch.std za pomocą funkcji skleianej st3

Wartość graniczna parametru =0.30, Waga Odch.std = 0.0454

Błąd genezy Vg =19.6885%

Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 15220.556 = -0.1285

- 1 : S01 odległość d(S01)=-0.0352 dla czasu t(S01)=11516.60
- 2 : S02 odległość d(S02)=-0.0556 dla czasu t(S02)=20231.60
- 3 : S03 odległość d(S03)=-0.0123 dla czasu t(S03)=33082.60
- 4 : S04 odległość d(S04)=-0.0166 dla czasu t(S04)=40628.60



Rys.5.11. Wizualizacja wyznaczenia wartości genezowanej parametru Wmin (waga $w_1=0,4452$) dla interpolacji funkcją sklejaną stopnia 3

Analiza wyników dla obiektu PŁIV1 wykazała, że:

1. Otrzymuje się różne najlepsze (według minimalnej wartości błędu genezy) metody genezowania dla parametrów diagnostycznych (tabela 5.10, kolor żółty):

- a) dla Wmin – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 19,5%),
- b) dla A.Rxx – metoda aproksymacji 2stopnia (błąd genezy = 27,3%),
- c) dla RMS(f) – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 23,7%),
- d) dla Asr – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 17,5%),
- e) dla RMS(t) – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 19,7%),
- f) dla Odch.std – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 19,7%).

2. Analiza zmian wartości parametru diagnostycznego Wmin w funkcji przyjętego czasu pracy dla analizowanych metod aproksymacji i interpolacji wykazała, że najbardziej przydatne do analizy zmian wartości parametrów diagnostycznych w funkcji czasu pracy maszyny w przedziale czasu $\Theta_i \in (\Theta_1, \Theta_b)$ są metody interpolacyjne. Wybór pomiędzy metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 1 (rys.5.10) i metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 3 (rys.5.11) będzie uzależniony od wartości błędu genezy i ilości przekroczeń przez funkcję interpolacyjną wartości granicznej (MAX). W przypadku braku przekroczeń należy wziąć pod uwagę wartość minimalnej odległości funkcji interpolacyjnej z błędem genezy od wartości granicznej (MAX) (kolor zielony, tabela 5.10).

3. W celu określenia przyczyny wystąpienia stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ na podstawie odległości wartości genezowanej parametrów diagnostycznych z błędem genezy od wartości granicznej parametru diagnostycznego dla PŁ1V1 wykorzystuje się:

- a) określenie odległości minimalnej od wartości granicznej d_{\min} dla stanów niezdatności związanych z czasem pracy obiektu (S01, S02, S03, S04);
- b) określenie przyczyny stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ przez badanie zależności okoliczności wystąpienia odległości minimalnej d_{\min} dla analizowanych stanów $s_i = \{S01, S02, S03, S04\}$.

Dla PŁ1V1 jest to metoda interpolacji 3 stopnia (tabela 5.10, kolor zielony), parametr Asr (odległość minimalna = - 0,08), gdzie:

- a) w przypadku wystąpienia stanu S01 odległość od wartości granicznej = - 0,01,
- b) w przypadku wystąpienia stanu S02 odległość od wartości granicznej = - 0,03,
- c) w przypadku wystąpienia stanu S03 odległość od wartości granicznej = 0,003,
- d) w przypadku wystąpienia stanu S04 odległość od wartości granicznej = 0,006.

Rozbieżności pomiędzy wartością minimalną odległości i odległościami przypisanymi do stanów S01, S02, S03, S04 (związane z procesem zużycia przekładni zębatej 1 – tabela 5.10, kolor zielony) nie pozwalają jednoznacznie oszacować przyczyny wystąpienia stanów niezdatności przekładni zębatej 1, co powoduje że alternatywnym rozwiązaniem może być analiza metod genezowania tylko dla parametrów o najwyższej wartości wagi lub uwzględnienie innych rozpatrywanych metod genezowania o zbliżonych wartościach błędów genezy). Spowoduje to prawdopodobnie zmianę metody genezowania, parametru diagnostycznego oraz minimalnej odległości od wartości granicznej parametru, co pozwoli prawdopodobnie na uzyskanie większej korelacji pomiędzy stanami niezdatności związanymi z procesem zużycia przekładni zębatej (stany S01, S02, S03, S04), wartością minimalną odległości d_{\min} i stanem przekładni zębatej $s_i(\Theta_b)$.

Analiza wyników dla pozostałych obiektów przekładni samochodowej zębatej 1 (PŁ2V1, PŁ1V2, PŁ2V20 wykazała, że:

1. Otrzymuje się różne najlepsze (według minimalnej wartości błędu genezy) metody genezowania dla różnych parametrów diagnostycznych):

- a) dla obiektu PŁ2V1 dla parametrów diagnostycznych (RMS(p), Odch.std, RMS(t), Cov.Rxx, RMS(f)) otrzymuje się odpowiednio: dla RMS(p) – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 16,1%), dla Odch.std – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 9,7%), dla RMS(t) – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 9,7%), dla

Cov.Rxx – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 21,5%), dla RMS(f) – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 8,8%),

- b) dla obiektu PŁ1V2 dla parametrów diagnostycznych (f_x , f_v , Szum, A.Rxy, A.Rxx) otrzymuje się odpowiednio: dla f_x – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 4,4%), dla f_v – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 8,7%), dla Szum – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 18,9%), dla A.Rxy – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 10,2%), dla A.Rxx – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 14,8%),
- c) dla obiektu PŁ2V2 dla parametrów diagnostycznych (f_x , f_v , Szum, Ka, T.Rxx) otrzymuje się odpowiednio: dla f_x – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 2,6%), dla f_v – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 4,7%), dla Szum – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 20,4%), dla Ka – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 1,7%), dla T.Rxx – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 9,8%),
- d) analiza zmian wartości parametrów diagnostycznych (o największej wartości wagi w_{ij}) w funkcji przyjętego czasu pracy dla analizowanych metod aproksymacji i interpolacji wykazała, że najbardziej przydatne do analizy zmian wartości parametrów diagnostycznych w funkcji czasu pracy przekładni w przedziale czasu $\Theta_i \in (\Theta_1, \Theta_b)$ są również metody interpolacyjne, zaś wybór pomiędzy metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 1 i metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 3 jest uzależniony od wartości błędu genezy i ilości przekroczeń przez funkcję interpolacyjną wartości granicznej (MAX).

2. W celu określenia przyczyny wystąpienia stanu niezdatności na podstawie badania minimalnej odległości d_{\min} dla pozostałych obiektów przekładni zębatej samochodowej przy wykorzystaniu algorytmu (jak dla PŁ1V1) otrzymuje się:

- a) dla PŁ1V2 – metoda aproksymacji 2 stopnia, parametr f_x (odległość = -11,7);
- b) dla PŁ2V1 – metoda metoda interpolacji 3 stopnia, parametr RMS(f) (odległość = 0,07);
- c) dla PŁ2V2 – metoda aproksymacji 2 stopnia, parametr Ka (odległość = 0,1).

Alternatywnym rozwiązaniem jest analiza metod genezowania tylko dla parametrów o najwyższej wartości wagi, wówczas odpowiednio dla:

- a) PŁ1V2 – metoda aproksymacji 2 stopnia, parametr f_x (odległość = -11,7);
- b) dla PŁ2V1 – metoda aproksymacji 2 stopnia, parametr RMS(p), (odległość = 0,05);
- c) dla PŁ2V2 – metoda aproksymacji 2 stopnia, parametr f_x (odległość = -1,9);

3. Podobnie jak dla obiektu PŁV1 rozbieżności pomiędzy wartością d_{\min} i odległościami przypisanymi do stanów S01, S02, S03, S04, S05, S06, S08 nie pozwalają jednoznacznie oszacować przyczyny wystąpienia stanów niezdatności przekładni zębatej 1, co powoduje że alternatywnym rozwiązaniem może być analiza metod genezowania dla parametrów o najwyższej wartości wagi w_{1j} i uwzględnienie innych rozpatrywanych metod genezowania o zbliżonych wartościach błędów genezy. Pozwoli to prawdopodobnie na uzyskanie większej korelacji pomiędzy stanami niezdatności związanymi z procesem zużycia przekładni zębatej a wartością minimalną odległości d_{\min} i stanem przekładni zębatej $s_i(\Theta_b)$.

Reasumując przeprowadzone badania metodyki genezowania stanu dla przekładni zębatej samochodowej 1 stwierdza się, że:

- a) w metodyce genezowania należy przyjąć parametry diagnostyczne według $w_{1j} \geq 0.1$ lub najwyższej wartości wagi w_{1j} ;
- b) weryfikowany algorytm genezowania stanu, ze względu na przedstawione powyżej rozbieżności, niejednoznacznie oszacowuje przyczyny wystąpienia stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ przekładni zębatej samochodowej 1. Wymaga to zastosowania metod genezowania o wyższych niż minimalne błędy genezy, zaś jako kryterium ich przyjęcia jest uzyskanie większej korelacji pomiędzy stanami niezdatności związanymi z procesem zużycia maszyny $s_i(\Theta_k)$, wartością minimalną odległości d_{\min} i stanem $s_i(\Theta_b)$.

Przekładnia zębata samochodowa 2

Parametry diagnostyczne

Badanie jakości procedury wyznaczenia zbioru parametrów diagnostycznych w aspekcie wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych do genezowania wartości parametrów diagnostycznych zrealizowano na podstawie wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych według metodyki przedstawionej w rozdziale 4 pracy. Dla zbioru danych (tabela 5.1) uzyskano zbiór parametrów diagnostycznych z odpowiednimi wartościami wagi w_{1j} , dla obiektu PŁV1 (tabela 5.11) i dla obiektu PŁV2 (tabela 5.12).

Analiza wyników wykazała, że:

- a) dla obiektu PŁV1 najwyższe wartości wagi w_{1j} posiadają parametry diagnostyczne (fv, W.V(t), P(A).02.std, fx), najniższe zaś parametry diagnostyczne (A.Rxx, Ca, Szum). W celu optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych dla obiektu PŁV1

(ilość parametrów, wartość wagi w_{ij}) proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq 0,01$ (uzyskuje się zbiór 4 elementy);

b) dla obiektu PŁV2: najwyższe wartości wagi w_{ij} posiadają parametry diagnostyczne (P(A).02.std P(A).2.std), najniższe zaś parametry diagnostyczne (ha, A.Rxx, Ja). W celu optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych dla obiektu PŁV2 (ilość parametrów, wartość wagi w_{ij}) proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq 0,01$ (uzyskuje się zbiór 2 elementy);

c) w celu optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych dla przekładni zębatej samochodowej 2 (ilość parametrów, wartość wagi w_{ij}) proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartości wagi $w_{ij} \geq 0,01$.

Tab. 5.11. Zbiór parametrów diagnostycznych dla obiektu PŁV1

Zbiór Parametrów Diagnostycznych dla PŁV1								
KOD_PARAM	NAZWA_PARAM	KOD_OB	NAZWA_OB	JEDN	RJ	HJ	DJI	W1J
Fv	Częstość Ricesa dla V	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,5739	0,32936	0,00276	0,69365
W.V(t)	Wigner ville dla czasu	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,57461	0,33018	0,01	0,19162
P(A).02std	Rozkład amplitudy 02 odch std	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,5635	0,31753	0,04292	0,04464
Fx	Częstość Ricesa dla X	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,54697	0,29918	0,10549	0,01817
P(A).2std	Rozkład amplitudy 2 odch std	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,51044	0,26055	0,23864	0,00803
A.Bcohe	Amplituda w bikoherencji	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,49553	0,24555	0,29092	0,00659
Kurioza	Współczynnik spłaszczenia	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,43197	0,1866	0,50071	0,00383
A.Bspec	Amplituda w bispectrum	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,37943	0,14397	0,65836	0,00291
Wmax	Wartość maksymalna	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,36634	0,1342	0,69546	0,00276
Ka	Współczynnik kształtu	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,27059	0,07322	0,94106	0,00204
Cov.Rxx	Kowariancja autokorelacji	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,26791	0,07178	0,94729	0,00202
RMS(f)	Wartość skuteczna po f	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,239	0,05712	1,01246	0,00189
RMS(t)	Wartość skuteczna po t	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,23686	0,0561	1,01713	0,00188
Wmin	Wartość minimalna	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,23483	0,05515	1,02153	0,00188
F.Rxx	Częstotliwość autokorelacji	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,21879	0,04787	1,05571	0,00182
Asr	Wartość średnia	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,2039	0,04158	1,08639	0,00176
Hf	Wsp. Luzu	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,14556	0,02119	1,19721	0,0016
Ja	Współczynnik impulsowości	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,13663	0,01867	1,2129	0,00158
Hv	Wsp. Harmoniczności	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,10623	0,01128	1,26383	0,00152
A.Rxx	Amplituda autokorelacji	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,10466	0,01095	1,26636	0,00151
Ca	Współczynnik szczytu	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,09949	0,0099	1,27462	0,0015
Szum	Stosunek sygnału do szumu	PŁV1	Przekładnia Ł V1	km	0,03318	0,0011	1,37157	0,0014

Tab. 5.12. Zbiór parametrów diagnostycznych dla obiektu PŁV2

Zbiór Parametrów Diagnostycznych dla PŁV2								
KOD PARAM	NAZWA PARAM	KOD OB	NAZWA OB	JEDN	RJ	HJ	DJI	W1J
P(A).02std	Rozkład amplitudy 02 odch std	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,74541	0,55564	0,01	0,78172
P(A).2std	Rozkład amplitudy 2 odch std	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,69223	0,47919	0,15498	0,05044
Wmax	Wartość maksymalna	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,42123	0,17743	0,80774	0,00968
Szum	Stosunek sygnału do szumu	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,41628	0,17329	0,81761	0,00956
Fv	Częstość Ricea dla V	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,3914	0,15319	0,86611	0,00903
Odch.std	Odchylenie standardowe	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,36804	0,13546	0,91003	0,00859
RMS(f)	Wartość skuteczna po f	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,36089	0,13024	0,92317	0,00847
Asr	Wartość średnia	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,35965	0,12935	0,92543	0,00845
Fx	Częstość Ricea dla X	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,3228	0,1042	0,99073	0,00789
A.Bcohe	Amplituda w bikoherencji	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,32076	0,10289	0,99423	0,00786
Cov.Rxx	Kowariancja autokorelacji	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,31403	0,09861	1,00571	0,00777
Kurioza	Współczynnik spłaszczenia	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,29724	0,08835	1,0338	0,00756
A.Bspec	Amplituda w bispectrum	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,23702	0,05618	1,12834	0,00693
T.Rxx	Czas autokorelacji	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,23439	0,05494	1,13227	0,0069
F.Rxx	Częstotliwość autokorelacji	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,21867	0,04782	1,15526	0,00677
Ka	Współczynnik kształtu	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,11761	0,01383	1,28847	0,00607
Hv	Wsp. Harmoniczności	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,08974	0,00805	1,32096	0,00592
W.V(t)	Wigner ville dla czasu	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,07206	0,00519	1,34067	0,00583
Wmin	Wartość minimalna	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,07017	0,00492	1,34274	0,00582
Ca	Współczynnik szczytu	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,03645	0,00133	1,37834	0,00567
Hf	Wsp. Luzu	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,01638	0,00027	1,39842	0,00559
A.Rxx	Amplituda autokorelacji	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,01515	0,00023	1,39962	0,00559
Ja	Współczynnik impulsowości	PŁV2	Przekładnia Ł V2	km	0,00628	0,00004	1,40822	0,00555

Reasumując przeprowadzone badania metodyki genezowania stanu w zakresie „Parametry diagnostyczne” dla przekładni zębatej samochodowej 2 stwierdza się, że:

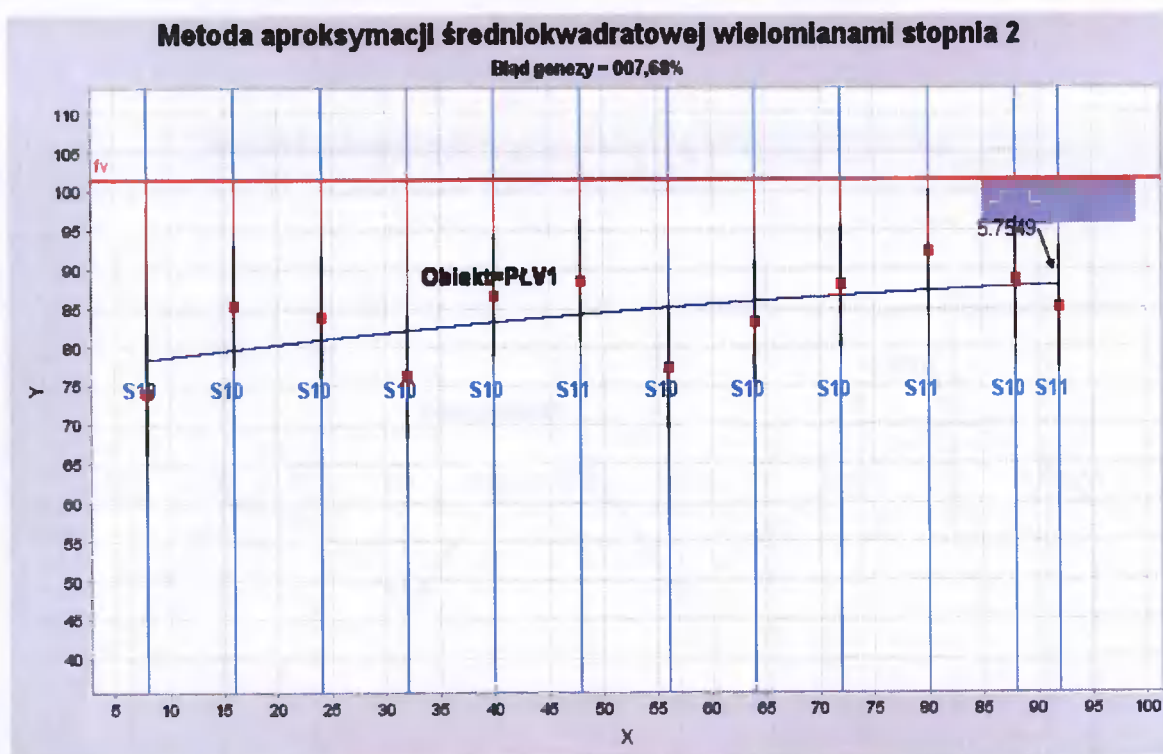
- w metodyce genezowania stanu maszyn proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq 0,01$ i odpowiadającej jej liczebności zbioru;
- proponuje się także rozpatrzyć zbiór parametrów diagnostycznych jednoelementowy, dla którego waga w_{ij} przyjmuje wartość maksymalną i wynikające stąd rozwiązania alternatywne;
- przyjęte kryteria optymalizacji jednoznacznie identyfikują zbiory wartości parametrów zmiennych w czasie eksploatacji oraz posiadających największą ilość informacji o stanie technicznym przekładni zębatej samochodowej 2.

Genezowanie stanu

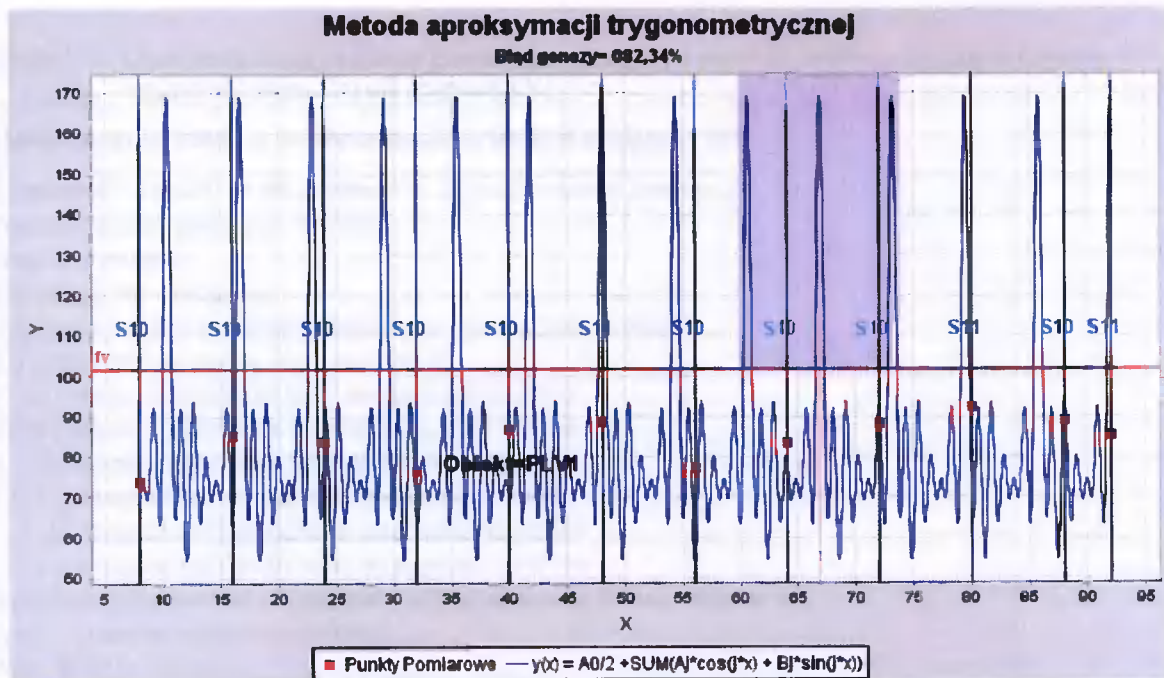
Badanie metodyki genezowania stanu dla przekładni zębatej samochodowej 2 w aspekcie wyznaczenia metody genezowania wartości parametru diagnostycznego według funkcji błędu genezy oraz badanie sposobu szacowania przyczyny stanu niezdatności na

podstawie odległości wartości genezowanej parametru diagnostycznego z błędem genezy od wartości granicznej realizowano na podstawie:

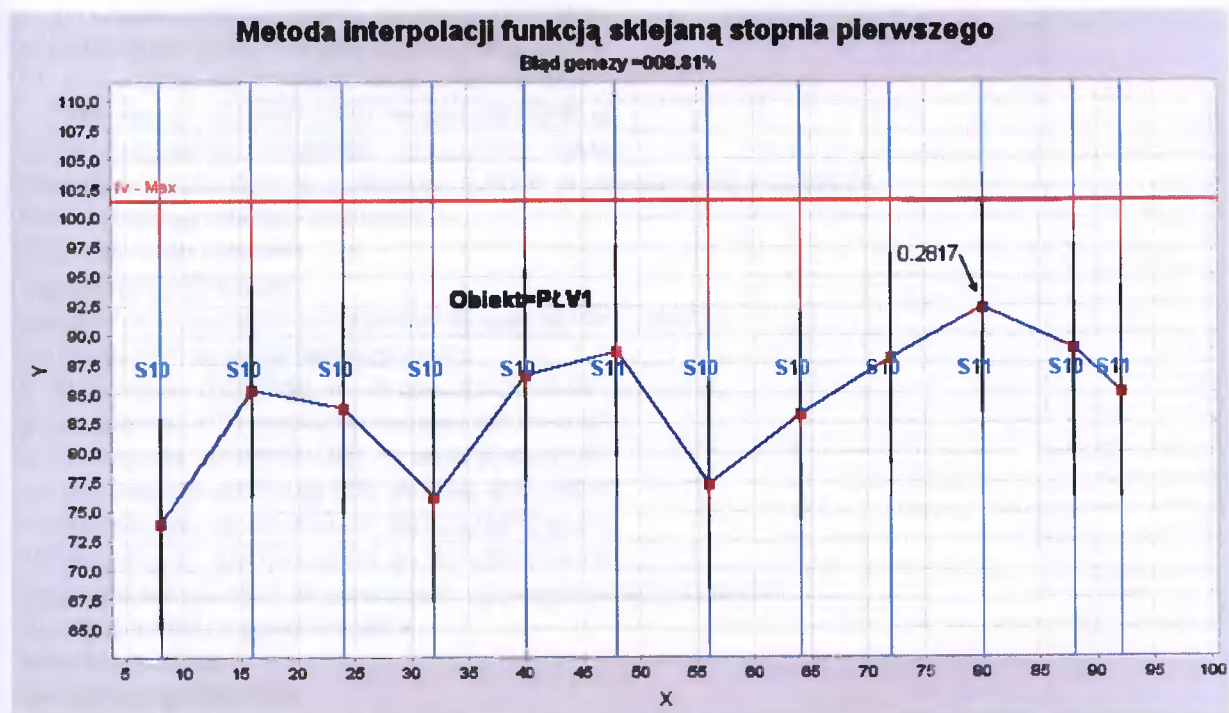
1. Określenia zbioru metod genezowania wartości parametrów diagnostycznych i sposobu szacowania przyczyny zaistnienia stanu niezdatności w chwili badania maszyny według metodyki przedstawionej w rozdziale 4 opracowania. Dla zbioru parametrów diagnostycznych (tabela 5.11) uzyskano wizualizację zmian wartości wybranych parametrów diagnostycznych, o największych wartościach wag w_{1j} , w funkcji przyjętego czasu pracy dla analizowanych metod aproksymacji i interpolacji. Przykładowe wizualizacje dla obiektu PŁV1 i parametru f_v przedstawiono na rys. 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, zaś dla obiektu PŁV2 i parametru f_v przedstawiono na rys. 5.16, 5.17, 5.18, 5.19. Przykładowy zestaw danych umożliwiający analizę genezowanych wartości parametrów diagnostycznych dla obiektu PŁV1 przedstawiono w tabeli 5.13, zaś dla obiektu PŁV2 przedstawiono w tabeli 5.14.



Rys.5.12. Wizualizacja wyznaczenia wartości genezowanej parametru f_v (waga $w_1=0,694$) dla aproksymacji średniokwadratowej stopnia 2



Rys.5.13. Wizualizacja wyznaczenia wartości genazowanej parametru f_v (waga $w_1=0,694$) dla aproksymacji trygonometrycznej



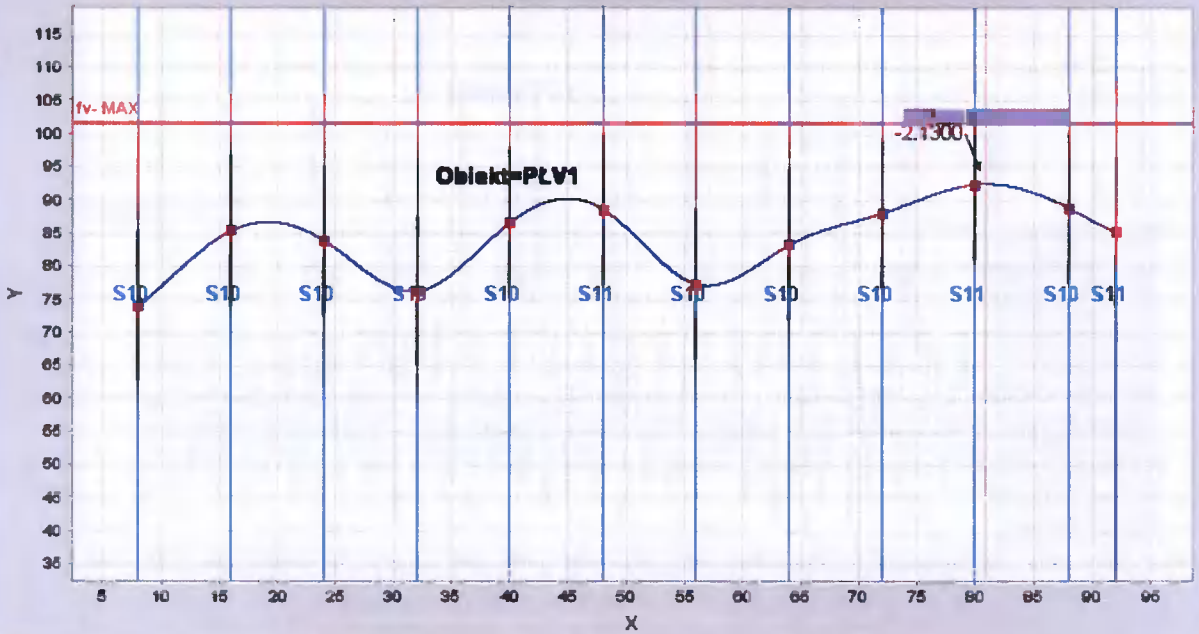
Rys.5.14. Wizualizacja wyznaczenia wartości genazowanej parametru f_v (waga $w_1=0,694$) dla interpolacji funkcją sklejaną stopnia 1

Tabela 5.13. Dane umożliwiające analizę genezowanych wartości parametrów diagnostycznych (metoda interpolacji stopnia 1) dla obiektu PŁV1

<p>Genezowanie Stanu z wykorzystaniem funkcji sklepanej St1</p> <p>Genezowanie Stanu PŁV1 dla parametru f_v za pomocą funkcji sklepanej st1</p> <p>Wartość graniczna parametru =101.4909,</p> <p>Waga f_v = 000.6937</p> <p>Błąd genezy V_g =008.8134%</p> <p>Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 79,9986 = 000.2825</p> <p>Dla obiektu PŁV1 występują następujące stany:</p> <p>5 : S10 odległość $d(S10)$=006.0254 dla czasu $t(S10)$=40.00</p> <p>6 : S11 odległość $d(S11)$=004.0352 dla czasu $t(S11)$=48.00</p> <p>9 : S10 odległość $d(S10)$=004.5897 dla czasu $t(S10)$=72.00</p> <p>10 : S11 odległość $d(S11)$=000.2817 dla czasu $t(S11)$=80.00</p> <p>11 : S10 odległość $d(S10)$=003.8064 dla czasu $t(S10)$=88.00</p> <p>12 : S11 odległość $d(S11)$=007.4478 dla czasu $t(S11)$=92.00</p> <p>Genezowanie Stanu PŁV1 dla parametru $W.V(t)$ za pomocą funkcji sklepanej st1</p> <p>Wartość graniczna parametru =000.0911</p> <p>Waga $W.V(t)$ = 000.1916</p> <p>Błąd genezy V_g =013.4256%</p> <p>Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 8,0000 = -000.004</p> <p>Dla obiektu PŁV1 występują następujące stany:</p> <p>5 : S10 odległość $d(S10)$=000.0467 dla czasu $t(S10)$=40.00</p> <p>6 : S11 odległość $d(S11)$=000.0449 dla czasu $t(S11)$=48.00</p> <p>9 : S10 odległość $d(S10)$=000.0374 dla czasu $t(S10)$=72.00</p> <p>10 : S11 odległość $d(S11)$=000.04 dla czasu $t(S11)$=80.00</p> <p>11 : S10 odległość $d(S10)$=000.0671 dla czasu $t(S10)$=88.00</p> <p>12 : S11 odległość $d(S11)$=000.0595 dla czasu $t(S11)$=92.00</p> <p>Genezowanie Stanu PŁV1 dla parametru $P(A).02std$ za pomocą funkcji sklepanej st1</p> <p>Wartość graniczna parametru =000.6435</p> <p>Waga $P(A).02std$ = 000.0446</p> <p>Błąd genezy V_g =013.2796%</p> <p>Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 56,0007 = 000.0531</p> <p>Dla obiektu PŁV1 występują następujące stany:</p> <p>5 : S10 odległość $d(S10)$=000.141 dla czasu $t(S10)$=40.00</p> <p>6 : S11 odległość $d(S11)$=000.0756 dla czasu $t(S11)$=48.00</p> <p>9 : S10 odległość $d(S10)$=000.0922 dla czasu $t(S10)$=72.00</p> <p>10 : S11 odległość $d(S11)$=000.1029 dla czasu $t(S11)$=80.00</p> <p>11 : S10 odległość $d(S10)$=000.0639 dla czasu $t(S10)$=88.00</p> <p>12 : S11 odległość $d(S11)$=000.0619 dla czasu $t(S11)$=92.00</p> <p>Genezowanie Stanu PŁV1 dla parametru f_x za pomocą funkcji sklepanej st1</p> <p>Wartość graniczna parametru =097.6557</p> <p>Waga f_x = 000.0182</p> <p>Błąd genezy V_g =010.2722%</p> <p>Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 79,9986 = -001.1541</p> <p>Dla obiektu PŁV1 występują następujące stany:</p> <p>5 : S10 odległość $d(S10)$=004.5107 dla czasu $t(S10)$=40.00</p> <p>6 : S11 odległość $d(S11)$=000.1749 dla czasu $t(S11)$=48.00</p> <p>9 : S10 odległość $d(S10)$=001.278 dla czasu $t(S10)$=72.00</p> <p>10 : S11 odległość $d(S11)$=-001.1545 dla czasu $t(S11)$=80.00</p> <p>11 : S10 odległość $d(S10)$=002.6307 dla czasu $t(S10)$=88.00</p> <p>12 : S11 odległość $d(S11)$=005.792 dla czasu $t(S11)$=92.00</p>

Metoda Interpolacji funkcją sklejaną stopnia trzeciego

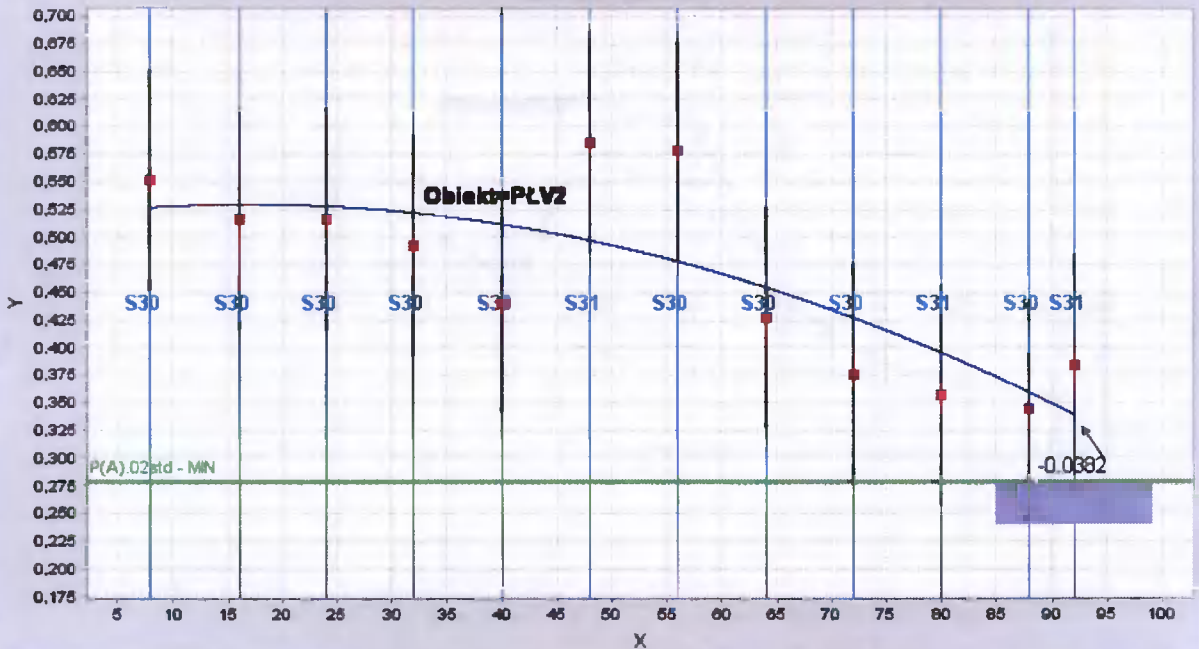
Błąd genezy = 011,12%



Rys.5.15. Wizualizacja wyznaczenia wartości genezowanej parametru f_v (waga $w_1=0,694$) dla interpolacji funkcją sklejaną stopnia 3

Metoda aproksymacji średniokwadratowej wielomianami stopnia 2

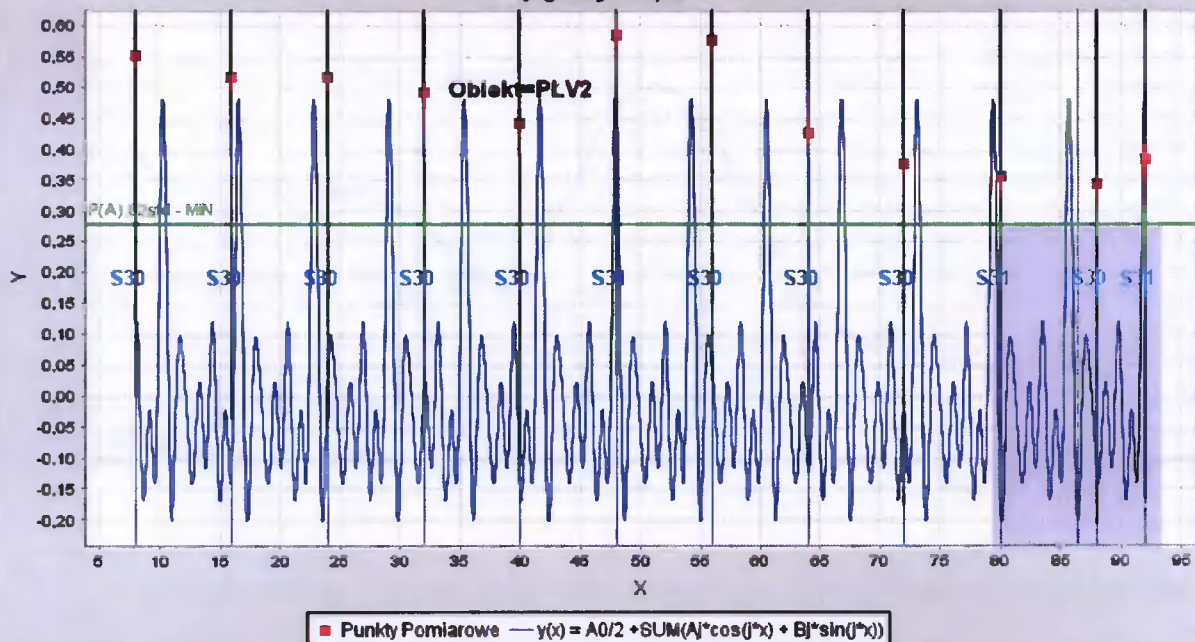
Błąd genezy = 015,47%



Rys.5.16. Wizualizacja wyznaczenia wartości genezowanej parametru $P2.02std$ (waga $w_1=0,782$) dla aproksymacji średniokwadratowej stopnia 2

Metoda aproksymacji trygonometrycznej

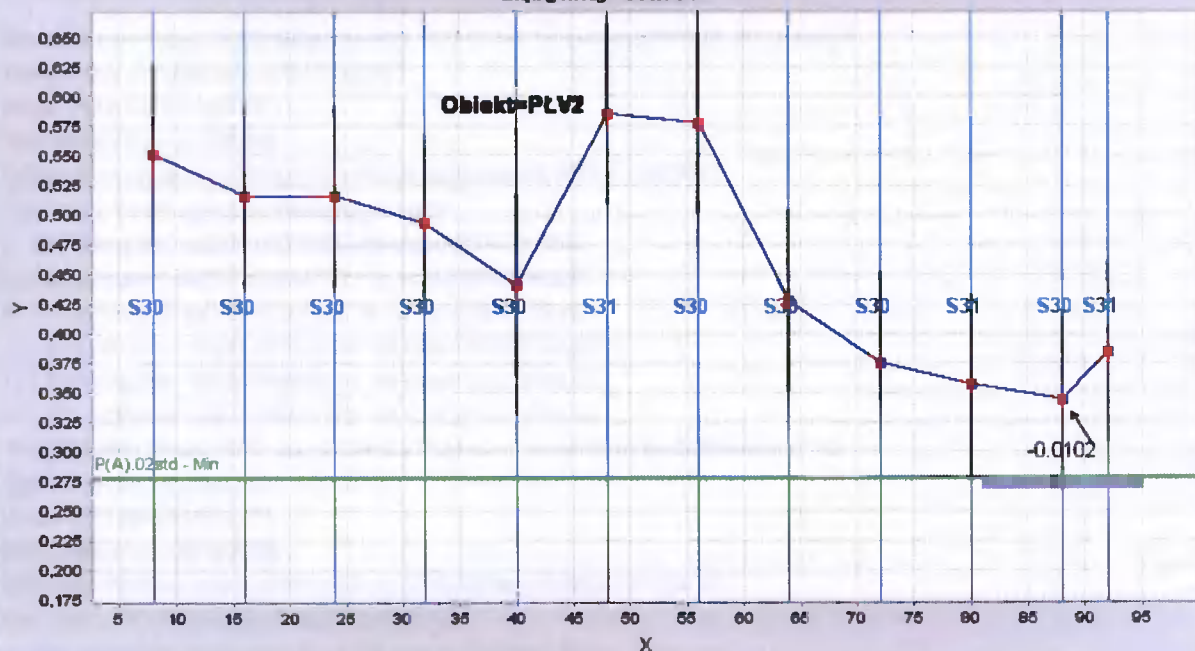
Błąd genazy= 085,62%



Rys.5.17. Wizualizacja wyznaczenia wartości genazowanej parametru P2.02std (waga $w_1=0,782$) dla aproksymacji trygonometrycznej

Metoda interpolacji funkcją sklejaną stopnia pierwszego

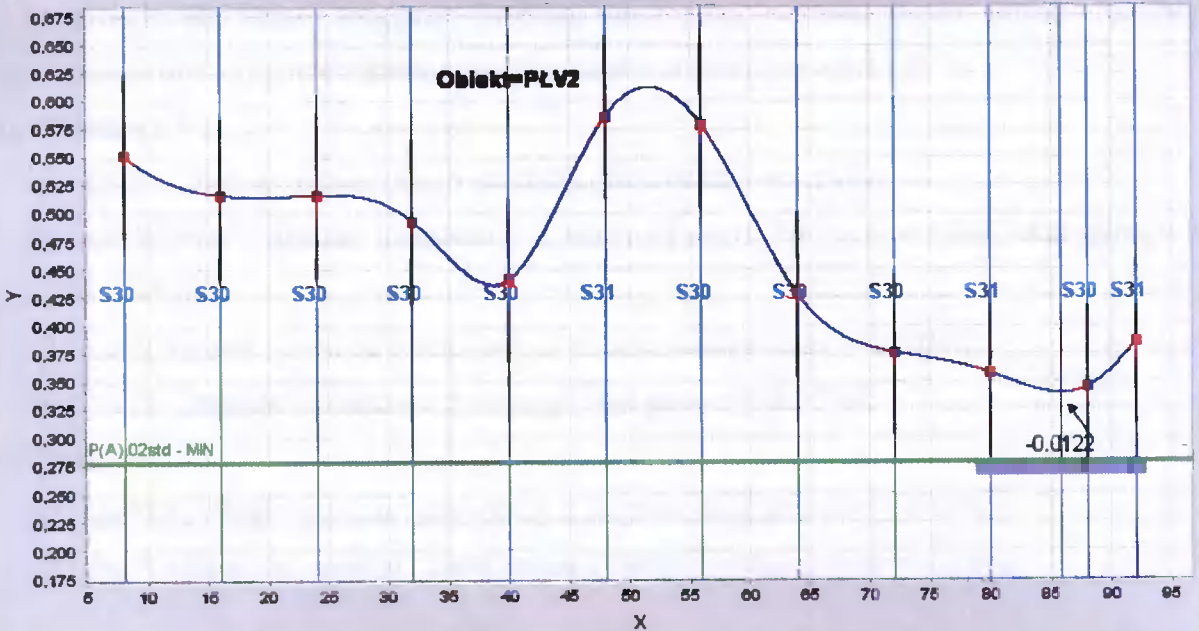
Błąd genazy= 011,84%



Rys.5.18. Wizualizacja wyznaczenia wartości genazowanej parametru P2.02std (waga $w_1=0,782$) dla interpolacji funkcją sklejaną stopnia 1

Metoda interpolacji funkcją sklejaną stopnia trzeciego

Błąd genезy = 011.32%



Rys.5.19. Wizualizacja wyznaczenia wartości genезowanej parametru P2.02std (waga $w_1=0,782$) dla interpolacji funkcją sklejaną stopnia 3

Tabela 5.14. Dane umożliwiające analizę genезowanych wartości parametrów diagnostycznych dla metody interpolacji stopnia 1 dla obiektu PŁV2

Genезowanie Stanu z wykorzystaniem funkcji sklejaney St1

Genезowanie Stanu PŁV2 dla parametru P(A).02std za pomocą funkcji sklejaney st1

Wartość graniczna parametru = 000.6435

Waga P(A).02std = 000.7817

Błąd genезy Vg = 011.8379%

Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 48,0014 = -000.0177

Dla obiektu PŁV2 występują następujące stany:

5 : S30 odległość $d(S30)=000.1269$ dla czasu $t(S30)=40.00$

6 : S31 odległość $d(S31)=-000.0177$ dla czasu $t(S31)=48.00$

9 : S30 odległość $d(S30)=000.1923$ dla czasu $t(S30)=72.00$

10 : S31 odległość $d(S31)=000.2108$ dla czasu $t(S31)=80.00$

11 : S30 odległość $d(S30)=000.2235$ dla czasu $t(S30)=88.00$

12 : S31 odległość $d(S31)=000.1835$ dla czasu $t(S31)=92.00$

Genезowanie Stanu PŁV2 dla parametru P(A).2std za pomocą funkcji sklejaney st1

Wartość graniczna parametru = 001.0989

Waga P(A).2std = 000.0504

Błąd genезy Vg = 002.0883%

Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 71,9993 = 000.0779

Dla obiektu PŁV2 występują następujące stany:

5 : S30 odległość $d(S30)=000.1141$ dla czasu $t(S30)=40.00$

6 : S31 odległość $d(S31)=000.1014$ dla czasu $t(S31)=48.00$

9 : S30 odległość $d(S30)=000.0779$ dla czasu $t(S30)=72.00$

10 : S31 odległość $d(S31)=000.0906$ dla czasu $t(S31)=80.00$

11 : S30 odległość $d(S30)=000.0926$ dla czasu $t(S30)=88.00$

12 : S31 odległość $d(S31)=000.0809$ dla czasu $t(S31)=92.00$

Analiza wyników dla obiektów PŁV1 i PŁV2 wykazała, że:

1. Otrzymuje się różne najlepsze (według minimalnej wartości błędu genezy) metody genezowania dla wybranych parametrów diagnostycznych (tabela 5.15):

dla obiektu PŁV1 :

- a) dla f_v – metoda aproksymacji 2stopnia (błąd genezy = 7,68%);
- b) dla $W.V(t)$ – metoda interpolacji 1 stopnia (tabela 5.13, kolor żółty, błąd genezy = 13,40%);
- c) dla $P(A).2std$ – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 7,20%);
- d) dla f_x – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 8,60%);

dla obiektu PŁV2:

- a) dla $P(A).02std$ – metoda interpolacji 3 stopnia (błąd genezy = 11,32%);
- b) dla $P(A).2std f_x$ – metoda aproksymacji 2stopnia (błąd genezy = 1,38%).

Tabela 5.15. Zestawienie wyników badań dla przekładni zębatej samochodowej 1 i przekładni zębatej samochodowej 2

Metoda genezowania	Wielkości	PŁV1				PŁV2	
		f_v	$W.V(t)$	$P(A).2std$	f_x	$P(A).02std$	$P(A).2std$
Aproksymacja wielomianowa 2 stopnia	Błąd genezy	7,68	31,80	11,56	8,60	15,47	1,38
	d_{min}	5,75	-0,02	0,08	4,55	-0,04	0,09
	Stan obiektu	S11	S10	S10	S11	S31	S31
Interpolacja 1 stopnia	Błąd genezy	8,81	13,40	13,28	10,27	11,84	2,09
	d_{min}	0,28	-0,05	0,05	-1,15	-0,01	0,08
	Stan obiektu	S11	S10	S10	S11	S30	S30
Interpolacja 3 stopnia	Błąd genezy	11,12	17,83	7,20	12,61	11,32	2,72
	d_{min}	-2,13	-0,09	0,09	-3,45	-0,01	0,07
	Stan obiektu	S11	S10	S10	S11	S30	S30

2. Dla PŁV1 analiza zmian wartości parametru diagnostycznego f_v w funkcji czasu pracy dla analizowanych metod aproksymacji (rys.5.12) i interpolacji (rys.5.14, 5.15) wykazała, że najbardziej przydatne do analizy zmian wartości parametrów diagnostycznych w funkcji czasu pracy maszyny (S10) i ewentualnych stanów niezdatności (S11) w przedziale czasu $\Theta_i \in (\Theta_1, \Theta_b)$ są metody interpolacyjne pomimo najniższej wartości błędu genezy dla metody aproksymacyjnej (tabela 5.15). Wynika to ze zbliżonej wartości błędu genezy, zaś wybór pomiędzy metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 1 i metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 3 będzie uzależniony od wartości błędu genezy i ilości przekroczeń przez

funkcję interpolacyjną wartości granicznej (MAX). W przypadku braku przekroczeń należy wziąć pod uwagę wartość d_{\min} (kolor żółty, tabela 5.15).

3. Dla PŁV2 analiza zmian wartości parametru diagnostycznego P2.02std w funkcji przyjętego czasu pracy dla analizowanych metod aproksymacji i interpolacji wykazała, że najbardziej przydatne do analizy zmian wartości parametrów diagnostycznych w funkcji czasu pracy maszyny (S30) i ewentualnych stanów niezdatności (S31) w przedziale czasu $\Theta_i \in (\Theta_1, \Theta_b)$ są metody interpolacyjne pomimo najniższej wartości błędu genezy dla metody aproksymacyjnej (rys.5.16). Wynika to ze zbliżonej wartości błędu genezy (rys. 5.18, 5.19) oraz bardziej „elastyczną” postacią krzywej interpolacyjnej, która jest bardziej wrażliwa na chwilowe zmiany wartości parametru diagnostycznego opisującego zmianę stanu maszyny. Wybór pomiędzy metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 1 i metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 3, podobnie jak dla obiektu PŁV1, będzie uzależniony od wartości błędu genezy i ilości przekroczeń przez funkcję interpolacyjną wartości granicznej (MIN), zaś w przypadku braku przekroczeń należy wziąć pod uwagę wartość d_{\min} (kolor żółty, tabela 5.15).

4. W celu określenia przyczyny wystąpienia stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ na podstawie odległości wartości genewizowanej parametrów diagnostycznych z błędem genezy od wartości granicznej parametru diagnostycznego dla PŁV1 i PŁV2, podobnie jak dla przekładni zębatej samochodowej 1, wykorzystuje się algorytm:

- a) określenie odległości minimalnej od wartości granicznej d_{\min} dla symulowanych stanów niezdatności (S11, S31) lub stanów niezdatności związanych z czasem pracy obiektów (S10, S30);
- b) określenie przyczyny stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ przez badanie zależności okoliczności wystąpienia odległości minimalnej d_{\min} dla analizowanych stanów $s_i = \{S10, S11, S30, S31\}$ w kontekście wystąpienia chwilowego stanu $s_i(\Theta_k)$ w przeszłości oraz warunków jego wystąpienia stanu (obciążenie, warunki terenowe, warunki klimatyczne, inne).

Dla PŁV1 jest to metoda interpolacji 3 stopnia, parametr P(A).2std ($d_{\min} = 0.09$, wyróżniony stan S10) lub w myśl ustaleń poczynionych powyżej metoda interpolacji 3 stopnia, parametr fv ($d_{\min} = -2,13$, wyróżniony stan S11).

Dla PŁV2 jest to metoda aproksymacji 2 stopnia, parametr P(A).2std ($d_{\min} = 0,09$, wyróżniony stan S31) lub w myśl ustaleń poczynionych powyżej metoda interpolacji 3 stopnia, parametr P(A).2std ($d_{\min} = -0,01$, wyróżniony stan S30).

5. Alternatywnym rozwiązaniem jest analiza metod genezowania tylko dla parametrów o najwyższej wartości wagi w_{1j} , wówczas odpowiednio dla:

- a) PŁV1 – metoda aproksymacji 2 stopnia, parametr f_v ($d_{\min} = 5,75$), wyróżniony stan S11;
- b) PŁV2 – metoda interpolacji 3 stopnia, parametr $P(A).02std$, ($d_{\min} = -0,01$), wyróżniony stan S30.

6. Analiza występowania wyróżnionych stanów S10 i S11 (obiekt PŁV1) dla analizowanych parametrów diagnostycznych oraz metod genezowania pozwala stwierdzić, że w przypadku parametrów f_v i f_x wyróżniony jest stany niezdatności S11 (obniżony poziom oleju), zaś w przypadku parametrów $W.V(t)$ i $P(A).2std$ wyróżniony jest stan S10, związany z czasem pracy obiektu.

7. W przypadku obiektu PŁV2 analiza występowania wyróżnionych stanów S30 i S31 dla analizowanych parametrów diagnostycznych oraz metod genezowania pozwala stwierdzić, że w przypadku parametru $P(A).02std$ wyróżniony jest stan niezdatności S30 (związany z czasem pracy obiektu), zaś dla $P(A).2std$ wyróżniony jest stan S31 (obniżony poziom oleju). Świadczy to o uniwersalności procedury, bowiem wyróżniane są zarówno stany związane z czasem pracy obiektów jak i symulowane stany niezdatności. Jednak ze względu na konieczność określenia przyczyny wystąpienia stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ na podstawie odległości d_{\min} bardziej preferowane jest wyróżnianie przez parametry diagnostyczne w przeszłości stanów niezdatności niezwiązanych z czasem pracy maszyny.

Reasumując przeprowadzone badania metodyki genezowania stanu dla przekładni zębatej samochodowej 2 stwierdza się, że:

- a) w metodyce genezowania proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne według wagi $w_{1j} \geq 0,01$;
- b) weryfikowany algorytm genezowania stanu jednoznacznie określa metodę genezowania wartości parametrów diagnostycznych w przeszłości, co potwierdza poprawność sformułowanej procedury i powinno umożliwić sformułowanie odpowiednich reguł wnioskowania w tym zakresie;
- c) wyróżnienie przez procedurę genezowania stanu stanów (S10, S30) związanych z czasem pracy przekładni oraz stanów niezdatności (S11, S31) świadczy o uniwersalności metodyki genezowania stanu, co zwiększa możliwości określania przyczyny stanu niezdatności w chwili badania $s_i(\Theta_b)$, bowiem uwzględnia zużycie

przekładni związane z czasem jej pracy jak i też pojawianiem się „chwilowych pełnych lub niepełnych stanów niezdatności;

- d) w związku z preferencją wyróżniania przez parametry diagnostyczne w przeszłości stanów niezdatności niezwiązanych z czasem pracy przekładni (S11, S31) interesującym problemem byłoby uwzględnienie dodatkowego kryterium redukcji zbioru parametrów diagnostycznych np. w postaci identyfikacji stanów niezdatności maszyny w przeszłości ($d_{\min} = f(\text{stan niezdatności maszyny})$).

Silniki spalinowe samochodów Star 11422

Parametry diagnostyczne

Badanie metodyki genezowania stanu w zakresie wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych do genezowania wartości parametrów diagnostycznych realizowano na podstawie wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych według metodyki przedstawionej w rozdziale 4 opracowania. Dla zbioru danych (tabela 5.3) uzyskano zbiór parametrów diagnostycznych z odpowiednimi wartościami wagi w_{ij} , przykładowo dla obiektu S11422_1 (tabela 5.16).

Tab. 5.16. Zbiór parametrów diagnostycznych dla obiektu S11422_1

Zbiór Parametrów Diagnostycznych dla S11422_1								
KOD_PARAM	NAZWA_PARAM	KOD_OB	NAZWA_OB	JEDN	RJ	HJ	DJI	W1J
NO2	Dwutlenek azotu	S11422_1	STAR11422 S1	Km	0,7524	0,5661	0,01	0,92297
Dym	zadymienie spalin	S11422_1	STAR11422 S1	Km	0,64334	0,41389	0,30545	0,03022
CxHx	Węglowodory	S11422_1	STAR11422 S1	Km	0,48773	0,23788	0,67816	0,01361
NOx	Tlenki azotu	S11422_1	STAR11422 S1	Km	0,32541	0,10589	0,99143	0,00931
CO	Tlenek węgla	S11422_1	STAR11422 S1	Km	0,28398	0,08064	1,0597	0,00871
CO2	Dwutlenek węgla	S11422_1	STAR11422 S1	km	0,22514	0,05069	1,14891	0,00803
NO	Tlenek azotu	S11422_1	STAR11422 S1	km	0,11667	0,01361	1,29089	0,00715

Analiza wyników dla obiektu S11422_1 wykazała, że najwyższe wartości wagi w_{ij} (kolor żółty) posiadają parametry diagnostyczne (NO₂, Dym, CxHx), najniższe zaś parametry diagnostyczne (CO₂, NO_x). W celu optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych dla obiektu S11422_1 (ilość parametrów, wartość wagi w_{ij}) proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq 0,01$ (uzyskuje się zbiór 3 elementowy).

Analiza wyników dla pozostałych silników spalinowych samochodów Star11422 wykazała, że najwyższe i najniższe wartości wagi w_{ij} posiadają różne parametry diagnostyczne: najwyższe: CxHx, Dym, CO, NO_x, (proponuje się przyjąć parametry

diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq 0,07$ – uzyskuje się zbiory 2, 3 lub 4 elementowe), najniższe: CO₂, NO z wartościami wagi $w_{ij} \leq 0,01$;

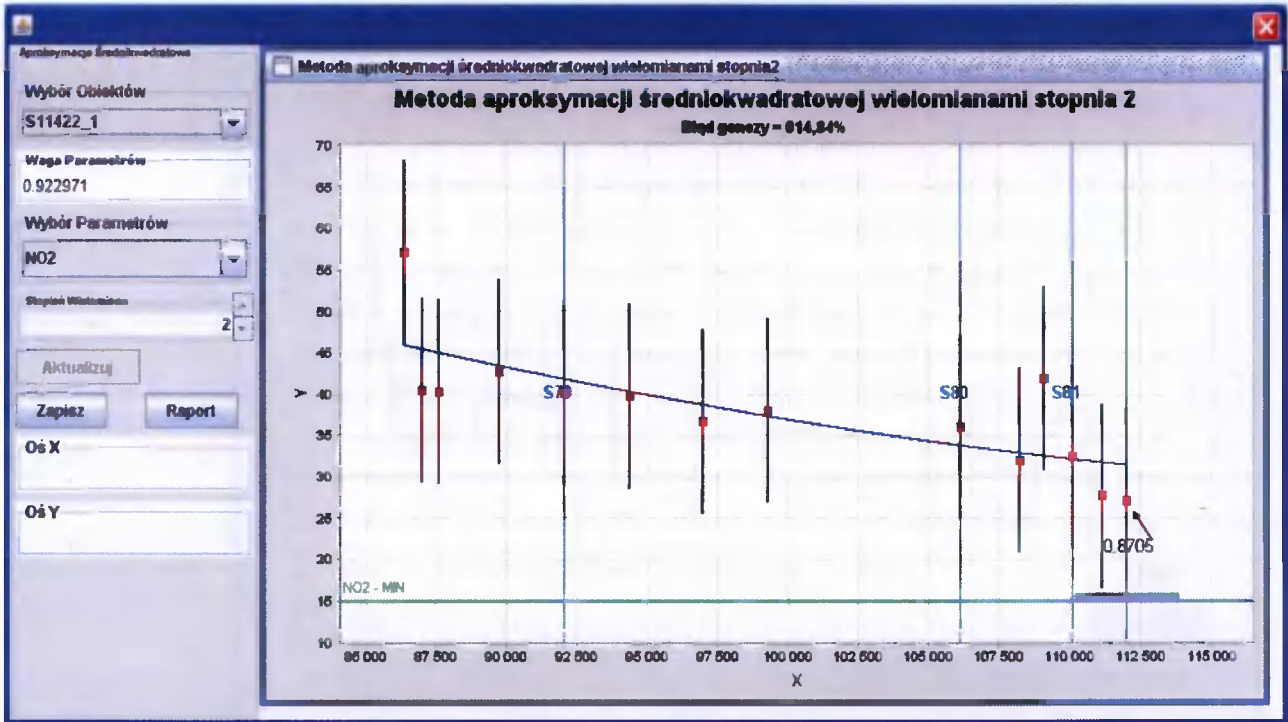
Reasumując przeprowadzone badania metodyki genezowania stanu w zakresie optymalizacji parametrów diagnostycznych dla silników spalinowych samochodów Star11422 stwierdza się, że:

- a) w metodyce genezowania stanu silników spalinowych samochodów Star11422 proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq 0,07$ i odpowiadającej jej liczebności zbioru;
- b) proponuje się także rozpatrzyć zbiór parametrów diagnostycznych jednoelementowy, dla którego waga w_{ij} przyjmuje wartość maksymalną;
- c) przyjęte kryteria optymalizacji jednoznacznie identyfikują zbiory wartości parametrów posiadających największą ilość informacji o stanie technicznym i zmiennych w czasie eksploatacji silników spalinowych samochodów Star 11422.

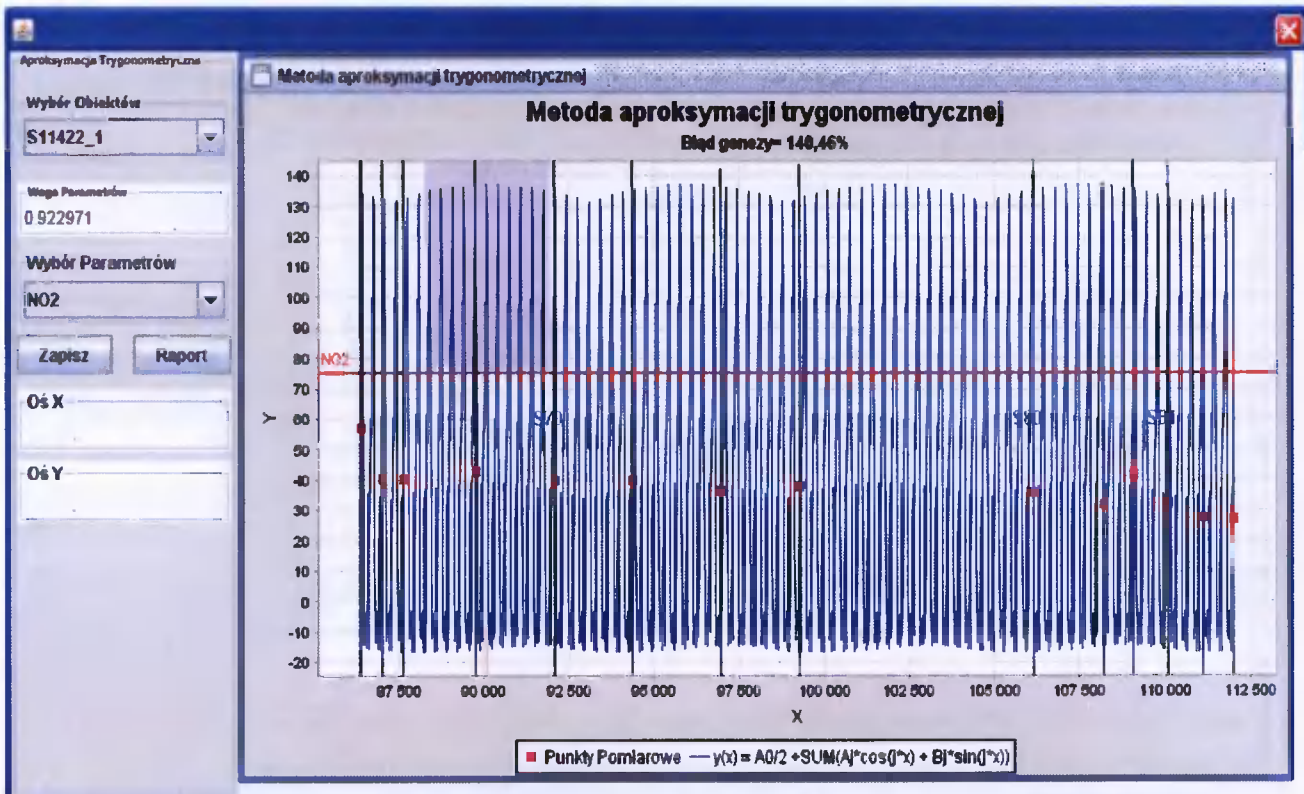
Genezowanie stanu

Badanie metodyki genezowania stanu dla silników spalinowych samochodów Star11422 w aspekcie wyznaczenia metody genezowania wartości parametru diagnostycznego według funkcji błędu genezy oraz badanie sposobu szacowania przyczyny stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ na podstawie odległości wartości genezowanej parametru diagnostycznego błędem genezy od wartości granicznej realizowano na podstawie:

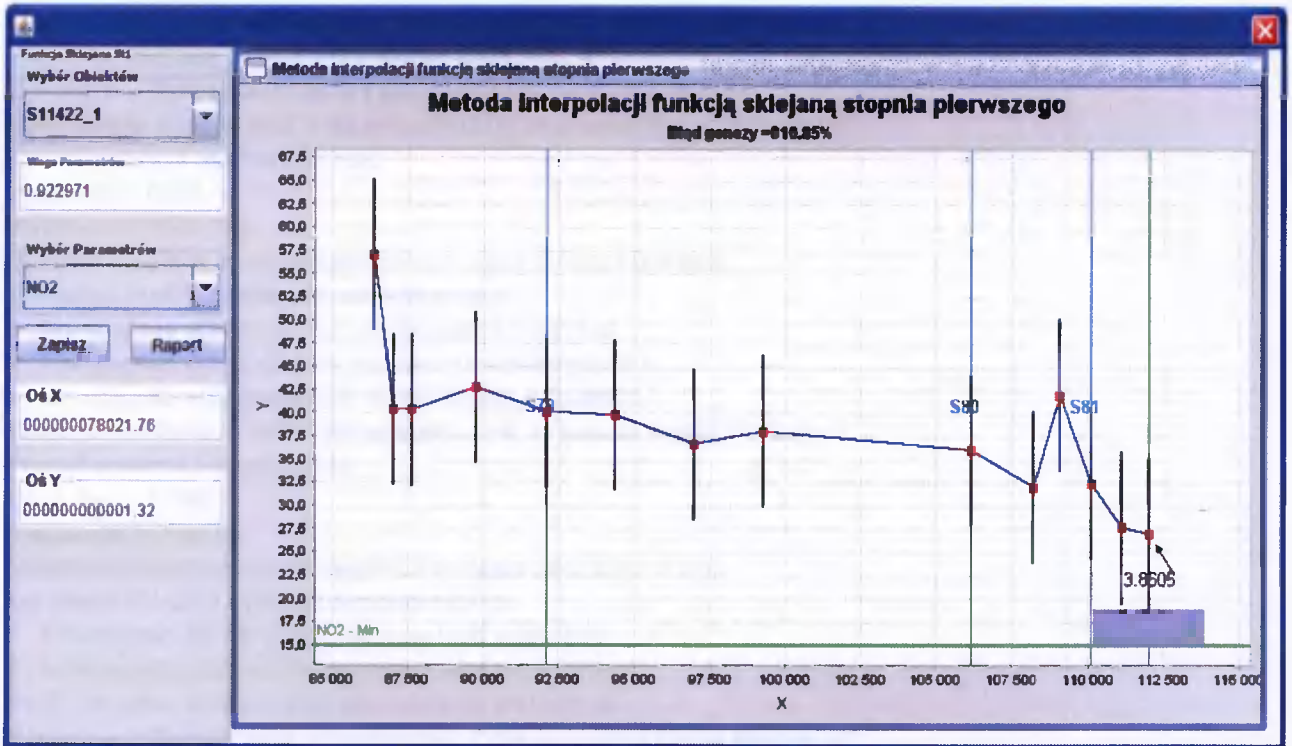
1. Określenia zbioru metod genezowania wartości parametrów diagnostycznych i sposobu określenia przyczyny zaistnienia stanu niezdatności w chwili badania maszyny według metodyki przedstawionej w rozdziale 4 opracowania. Dla zbioru parametrów diagnostycznych (tabela 5.16) uzyskano wizualizację zmian wartości wybranych parametrów diagnostycznych, o największych wartościach wag, w funkcji przyjętego czasu pracy dla analizowanych metod aproksymacji i interpolacji. Przykładowe wizualizacje dla obiektu S11422_1 i parametru diagnostycznego NO₂ przedstawiono na rys. 5.20 – 5.23. Przykładowy zestaw danych umożliwiający analizę genezowanych wartości parametrów diagnostycznych dla obiektu S11422_1 przedstawiono w tabeli 5.17.



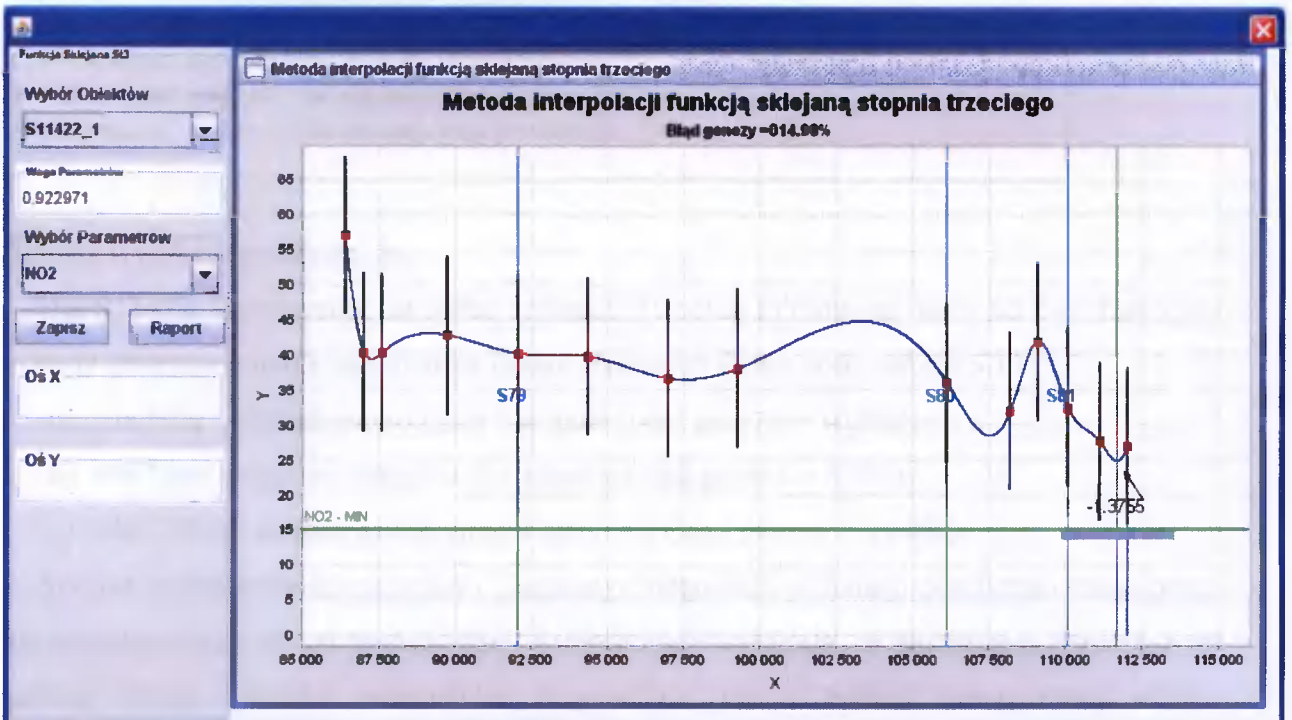
Rys.5.20. Wizualizacja wyznaczenia wartości genozowanej parametru NO₂ (waga $w_1=0,9229$) dla aproksymacji średniokwadratowej stopnia 2



Rys.5.21. Wizualizacja wyznaczenia wartości genozowanej parametru NO₂ (waga $w_1=0,9229$) dla aproksymacji trygonometrycznej



Rys.5.22. Wizualizacja wyznaczenia wartości genezowanej parametru NO₂ (waga $w_1=0,9229$) dla interpolacji funkcją splejaną stopnia 1



Rys.5.23. Wizualizacja wyznaczenia wartości genezowanej parametru NO₂ (waga $w_1=0,9229$) dla interpolacji funkcją splejaną stopnia 3

Tabela 5.17. Dane umożliwiające analizę wartości parametrów diagnostycznych dla metody interpolacji funkcją sklejaną stopnia 1 dla obiektu Star1 1422 1

Genezowanie Stanu z wykorzystaniem funkcji skleianej St1	
Genezowanie Stanu S11422_1 dla parametru NO2 za pomocą funkcji skleianej st1	
Wartość graniczna parametru =075.00	
Waga NO2 = 0.923	
Błąd genezy Vg =10.85%	
Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 86385.0 = 009.8305	
Dla obiektu S11422_1 występują następujące stany:	
1 :	S79 odległość d(S79)=26.7605 dla czasu t(S79)=92075.00
2 :	S80 odległość d(S80)=30.8605 dla czasu t(S80)=106145.00
3 :	S81 odległość d(S81)=034.4305 dla czasu t(S81)=110086.00
Genezowanie Stanu S11422_1 dla parametru Dym za pomocą funkcji skleianej st1	
Wartość graniczna parametru =4.00	
Waga Dym = 0.0302	
Błąd genezy Vg =8.66%	
Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 109073.99 = 1.9632	
Dla obiektu S11422_1 występują następujące stany:	
1 :	S79 odległość d(S79)=2.7732 dla czasu t(S79)=92075.00
2 :	S80 odległość d(S80)=2.0732 dla czasu t(S80)=106145.00
3 :	S81 odległość d(S81)=2.6132 dla czasu t(S81)=110086.00
Genezowanie Stanu S11422_1 dla parametru CxHx za pomocą funkcji skleianej st1	
Wartość graniczna parametru =4.60	
Waga CxHx = 0.0136	
Błąd genezy Vg =39.79%	
Odległość minimalna do wartości granicznej dla czasu 94370.00 = -0.2706	
Dla obiektu S11422_1 występują następujące stany:	
1 :	S79 odległość d(S79)=2.6894 dla czasu t(S79)=92075.00
2 :	S80 odległość d(S80)=0.1194 dla czasu t(S80)=106145.00
3 :	S81 odległość d(S81)=1.2594 dla czasu t(S81)=110086.00

Analiza wyników wykazała, że:

1. Dla S11422_1 otrzymuje się różne najlepsze (według minimalnej wartości błędu genezy) metody genezowania dla parametrów diagnostycznych (kolor żółty, tabela 5.17):

- dla NO₂ – metoda interpolacji 1 stopnia (błąd genezy = 10,9%),
- dla Dym – metoda interpolacji 1 stopnia (błąd genezy = 8,7%),
- dla CxHx – metoda aproksymacji stopnia 2 (błąd genezy = 39,8%).

2. Analiza zmian wartości parametru diagnostycznego NO₂ w funkcji przyjętego czasu pracy dla analizowanych metod aproksymacji i interpolacji wykazała, że najbardziej przydatne do analizy zmian wartości parametrów diagnostycznych w funkcji czasu pracy silnika spalinowego w przedziale czasu $\Theta_i \in (\Theta_1, \Theta_b)$ są metody interpolacyjne. Wybór pomiędzy metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 1 (rys.5.22) i metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 3 (rys.5.23) będzie uzależniony od wartości błędu genezy i ilości przekroczeń przez funkcję interpolacyjną wartości granicznej (MIN). W przypadku braku

przekroczeń należy wziąć pod uwagę wartość minimalnej odległości funkcji interpolacyjnej z błędem genezy od wartości granicznej (MIN) d_{\min} – kolor żółty (tabela 5.17).

3. W celu określenia przyczyny wystąpienia stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ na podstawie odległości wartości genezowanej parametrów diagnostycznych z błędem genezy od wartości granicznej parametru diagnostycznego dla S11422_1 wykorzystuje się, jak dla poprzednich obiektów, algorytm:

- a) określenie odległości minimalnej od wartości granicznej d_{\min} stanów niezdatności związanych z czasem pracy obiektu (S79, S80, S81);
- b) określenie przyczyny stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ przez badanie zależności okoliczności wystąpienia odległości minimalnej d_{\min} dla analizowanych stanów $s_i = \{S79, S80, S81\}$ w kontekście wystąpienia chwilowego stanu $s_i(\Theta_k)$ w przeszłości oraz warunków jego wystąpienia.

Dla S11422_1 jest to metoda interpolacji stopnia 1 (tabela 5.17), parametr Dym (odległość minimalna = 1,96):

- a) w przypadku wystąpienia stanu S79 odległość od wartości granicznej = 2,77;
- b) w przypadku wystąpienia stanu S80 odległość od wartości granicznej = 2,07;
- c) w przypadku wystąpienia stanu S81 odległość od wartości granicznej = 2,61.

Rozbieżności pomiędzy wartością minimalną odległości d_{\min} i odległościami przypisanymi do stanów S79, S80, S81 (związane z procesem zużycia silnika spalinowego samochodu Star 11422) nie pozwalają jednoznacznie oszacować przyczyny uszkodzenia silnika (wzrost zadymienia spalin), co powoduje że alternatywnym rozwiązaniem może być analiza metod genezowania tylko dla parametrów o najwyższej wartości wagi lub uwzględnienie innych rozpatrywanych metod genezowania o zbliżonych wartościach błędów genezy.

4. Badanie wartości genezowanej parametrów diagnostycznych wraz z błędem genezy i sposobu szacowania przyczyny zaistnienia stanu niezdatności w chwili badania pozostałych silników spalinowych samochodów Star11422 w zależności od metody genezowania wartości parametrów diagnostycznych. Analiza wyników badań wykazała, że otrzymuje się różne najlepsze (według minimalnej wartości błędu genezy) metody genezowania dla różnych parametrów diagnostycznych w różnych obiektach Star11422. Dla parametrów diagnostycznych (CxHx, Dym, CO, NOx) otrzymuje się odpowiednio:

- a) dla CxHx – metoda interpolacji stopnia 1 (błąd genezy = 7,4%),
- b) dla Dym – metoda aproksymacji 2 stopnia (błąd genezy = 6,6%),
- c) dla CO – metoda interpolacji stopnia 1 (błąd genezy = 2,9%),

d) dla NOx – metoda interpolacji stopnia 1 (błąd genezy = 5,1%).

5. Analiza zmian wartości parametrów diagnostycznych (o największej wartości wagi w_{ij}) w funkcji przyjętego czasu pracy dla analizowanych metod aproksymacji i interpolacji wykazała, że najbardziej przydatne do analizy zmian wartości parametrów diagnostycznych w funkcji czasu pracy silników spalinowych samochodów Star11422 w przedziale czasu $\Theta_i \in (\Theta_1, \Theta_b)$ są również metody interpolacyjne, zaś wybór pomiędzy metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 1 i metodą interpolacji funkcją sklejaną stopnia 3 jest uzależniony od wartości błędu genezy i ilości przekroczeń przez funkcję interpolacyjną wartości granicznej (MIN). W przypadku braku przekroczeń należy wziąć pod uwagę wartość minimalnej odległości funkcji interpolacyjnej z błędem genezy od wartości granicznej (MIN).

6. W celu określenia przyczyny wystąpienia stanu niezdatności $s_i(\Theta_b)$ na podstawie badania minimalnej odległości d_{min} dla pozostałych obiektów silników samochodów Star11422 występują podobne rozbieżności (jak dla obiektu S11422_1) pomiędzy wartością minimalnej odległości d_{min} i odległościami przypisanymi do stanów S78, S82, S83, co nie pozwala jednoznacznie oszacować przyczyny uszkodzenia silnika (np. wzrostu emisji CO w spalinach). Powoduje to, że alternatywnym rozwiązaniem może być analiza metod genezowania tylko dla parametrów o najwyższej wartości wagi lub uwzględnienie innych rozpatrywanych metod genezowania o zbliżonych wartościach błędów genezy. Spowoduje to prawdopodobnie zmianę metody genezowania, parametru diagnostycznego oraz minimalnej odległości od wartości granicznej parametru, co pozwoli na uzyskanie większej korelacji pomiędzy stanami niezdatności związanymi z procesem zużycia silnika spalinowego i wartości odległości d_{min} .

Reasumując przeprowadzone badania metodyki genezowania stanu silników spalinowych samochodów Star11422 stwierdza się, że:

- a) w metodyce genezowania stanu maszyn proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne według wartości wagi $w_{ij} \geq 0,07$;
- b) weryfikowana procedura stanu niejednoznacznie identyfikuje metodę genezowania wartości parametru diagnostycznego, umożliwiającą określenie przyczyny stanu niezdatności silników spalinowych samochodów Star11422 w chwili Θ_b . Oznacza to, że w przypadku stanów niezdatności związanych z procesem zużycia silnika spalinowego (S77 – S83) wymaga się stosowania metod genezowania o wyższych niż minimalne błędy genezy, zaś jako kryterium ich przyjęcia jest uzyskanie większej

korelacji pomiędzy stanami niezdatności związanymi z procesem zużycia silników spalinowych i wartością minimalną odległości d_{\min} .

5.3. Dedykowane reguły wnioskowania w procesie genezowania stanu

Z analizy wymagań działaniowych i konfiguracji systemu rozpoznawania stanu maszyny poczynionych w rozdziale 1 i 4 pracy wynika, że pokładowy system rozpoznawania stanu maszyny, w obszarze genezowania stanu, powinien zapewnić:

- a) skonfigurowanie systemu w zakresie wyznaczonych uprzednio potrzeb, w tym obejmujących wprowadzenie odpowiedniej liczby parametrów diagnostycznych, ich wartości granicznych i wartości nominalnych parametrów diagnostycznych, stanów maszyny i czasu pracy maszyny;
- b) wnioskowanie diagnostyczne w oparciu o analizę relacji między wartościami wzorcowymi a mierzonymi na podstawie analizy reguł wnioskowania diagnostycznego;
- c) wizualizację stanu maszyny, w tym generowanie decyzji eksploatacyjnych w zakresie genezowania stanu (zdatny, niezdatny, lokalizacja uszkodzenia, określenie przyczyny stanu niezdatności w chwili Θ_b).

Wynika z tego, że konieczne staje się utworzenie bazy danych, w której obok zbiorów wartości granicznych i nominalnych oraz zbioru wartości parametrów diagnostycznych rejestrowanych podczas eksploatacji są reguły wnioskowania diagnostycznego.

Analiza wyników badań opracowanej metodyki genezowania stanu maszyn, którą przeprowadzono dla wybranych układów maszyn (podrozdział 5.2) pozwala na wstępne sformułowanie dedykowanych reguł wnioskowania typu „IF – THEN” lub „IF – THEN – ELSE” w obszarze:

- a) optymalizacji parametrów diagnostycznych;
- b) genezowania stanu.

Dla przekładni zębatej samochodowej i silników spalinowych samochodów Star11422 będą to odpowiednio:

- a) dla optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych Y^0 :
 - jeśli $w_{1j} \geq 0,1$ to $y_j \in Y^0$, (dla przekładni zębatej samochodowej),
 - jeśli $w_{1j} \geq 0,07$ to $y_j \in Y^0$, (dla silników spalinowych samochodów Star 11422),
 - lub jeśli $w_{1j} = w_{1j\max}$ to $y_j \in Y^0$;

b) dla genezowania stanu:

- jeśli występuje zbiór prawdopodobnych uszkodzeń to określenie zbioru stanów jego niezdatności według poziomu prawdopodobieństwa występowania uszkodzeń według reguły: jeśli $p(s_i) \geq 0,5$ to $s_i \in S$,
- jeśli nie występuje zbiór prawdopodobnych uszkodzeń to określenie zbioru stanów jego niezdatności według wartości miary eksploatacji: jeśli $\Theta_i \geq \Theta_l$ to $s_i (\Theta_l) \in S$,
- jeśli błąd genezy metody interpolacji 1 stopnia dla $y_j \in Y^0 \leq$ błędu genezy metoda interpolacji 3 stopnia dla $y_j \in Y^0$ to metodą genezowania wartości $y_j \in Y^0$ jest metoda interpolacji 3 stopnia, w przeciwnym przypadku metoda genezowania wartości $y_j \in Y^0$ jest metoda interpolacji 1 stopnia,
- jeśli odległość $d(\bullet)$ wartości genezowanej parametru diagnostycznego $y_j \in Y^0$ z błędem genezy od wartości granicznej parametru y_{jg} : $d(y_{jg} - \text{wartość } (y_{jG} + r_G))$ dla $y_{jg} > y_{jG}$, $d(\text{wartość } ((y_{jG} - r_G) - y_{jg}))$ dla $y_{jg} < y_{jG}$ to wartość minimalna $d(\bullet)$ jest odległością minimalną d_{\min} ,
- jeśli $d_{\min} = 0$ to występuje jeden punkt wspólny z wartością graniczną (liczebność $[d_{\min}] = 1$), jeśli $d_{\min} < 0$ to występuje więcej niż jeden punkt wspólny z wartością graniczną (liczebność $[d_{\min}] > 1$), jeśli $d_{\min} > 0$ to nie występuje punkt wspólny z wartością graniczną,
- jeśli $d_{\min} = d_{\min}(\Theta(s_i))$ to wartość minimalna $d_{\min}^s = d_{\min}$ występuje przy stanie $s_i(\Theta_s)$, co oznacza że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu $s_i(T_{LU})$ było „chwilowe pojawienie” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) , w przeciwnym przypadku $d_{\min} \neq d_{\min}(\Theta(s_i))$, co oznacza że nie można określić przyczyny wystąpienia stanu $s_i(T_{LU})$,
- jeśli liczebność $[d_{\min}^s] > 1$ to oznacza, że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu $s_i(T_{LU})$ był „narastający rozwój” w czasie (Θ_1, Θ_b) warunków wystąpienia stanu $s_i(T_{LU})$,
- jeśli $d_{\min} > 0$ i nie występuje punkt wspólny z wartością graniczną to oznacza że prawdopodobną przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu $s_i(T_{LU})$ było „chwilowe niepełne pojawienie się” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) .

Analiza opracowanych reguł wnioskowania dla przekładni zębatej samochodowej oraz silników spalinowych samochodów Star 11422 wskazuje na duże ich podobieństwo z wyjątkiem reguł optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych Y^0 , co wskazuje na uniwersalność opracowanej metodyki genezowania stanu maszyn.

5.4. Wnioski

W rozdziale rozpatrzono zagadnienia dotyczące badań, przy wykorzystaniu programu komputerowego „Genezowanie Stanu”, metodyki genezowania stanu wybranych układów maszyn: przekładnia zębata samochodowa i silniki spalinowe samochodów Star 11422.

1. Określono zakres badań procedur genezowania stanu maszyn, który zawiera:

- a) badanie zbioru parametrów diagnostycznych w aspekcie wyznaczenia optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych do genezowania wartości parametrów diagnostycznych na podstawie wyników badań układów maszyn;
- b) badanie procedury genezowania stanu układów maszyn poprzez:
 - wyznaczenie metody genezowania wartości parametru diagnostycznego według błędu genezy,
 - badanie sposobu szacowania przyczyny stanu niezdatności na podstawie minimalnej odległości wartości genezowanej parametru diagnostycznego od wartości granicznej.

2. Przeprowadzono badania procedur metodyki dla układów maszyn: przekładnia zębata samochodowa 1, przekładnia zębata samochodowa 2 oraz silniki spalinowe samochodów Star 11422. Analiza wyników badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- a) w metodyce genezowania stanu maszyn proponuje się przyjąć parametry diagnostyczne o wartościach wagi $w_{ij} \geq (0,01 - 0,1)$ i odpowiadającej jej liczebności zbioru, ewentualnie określić zbiór parametrów diagnostycznych jednoelementowy, dla którego waga w_{ij} przyjmuje wartość maksymalną;
- b) w celu określenia przyczyny wystąpienia stanu niezdatności na podstawie odległości wartości genezowanej parametrów diagnostycznych z błędem genezy od wartości granicznej parametru diagnostycznego należy wykorzystać algorytm (analiza parametrów diagnostycznych na podstawie maksymalnej wartości wagi, analiza metod genezowania wartości parametru diagnostycznego na podstawie minimalnego błędu genezy, określenie odległości minimalnej genezowanej wartości parametru diagnostycznego od wartości granicznej), którego realizacja dla różnych układów maszyn może generować różne rozwiązania. Alternatywnym rozwiązaniem jest analiza metod genezowania tylko dla parametrów diagnostycznych o najwyższej wartości wagi w_{ij} ;
- c) przedstawione oraz przebadane procedury metodyki genezowania stanu jednoznacznie (dla symulowanych stanów niezdatności S11, S31) identyfikują parametry

diagnostyczne i metody genezowania wartości parametrów diagnostycznych. Umożliwia to szacowanie minimalnej odległości d_{\min} i pozwala określić przyczynę stanu niezdatności w chwili badania Θ_b (wystąpienie chwilowe stanu niezdatności w przeszłości oraz warunków jego wystąpienia – np. stan S11 w przypadku obiektu PŁV1). Potwierdza to poprawność sformułowanych procedur metodyki oraz działania programu „Genezowanie stanu”.

3. Na podstawie wyników badań procedur metodyki dla układów maszyn: przekładni zębatej samochodowej, silników spalinowych samochodów Star 11422 opracowano dedykowane reguły wnioskowania diagnostycznego:

- a) dla optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych Y^0 poprzez określenie wartości wagi w_{1j} ;
- b) dla genezowania stanu poprzez:
 - określenie zbioru stanów (kryterium wartości prawdopodobieństwa $p(s_i)$),
 - określenie zbioru stanów (kryterium wartości czasu eksploatacji $s_i (\Theta_i) \in S$),
 - określenie metody genezowania wartości parametrów diagnostycznych poprzez minimalizację błędu genezy,
 - określenie sposobu wyznaczenia odległości minimalnej d_{\min} pomiędzy wartością genezowaną parametru diagnostycznego $y_j \in Y^0$ z błędem genezy od wartości granicznej parametru y_{jg} ,
 - określenie sposobu interpretacji d_{\min} w zależności od jej wartości ($d_{\min}=0$, $d_{\min} >0$, $d_{\min} <0$) oraz ich występowania w czasie występowania stanów ($d_{\min}^s = d_{\min}$).

4. Przedstawione reguły wnioskowania mogą i powinny stanowić podstawę do projektowania, wykonania i wdrożenia oprogramowania systemu dla pokładowego i stacjonarnego systemu rozpoznawania stanu maszyn.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono metodologię rozwiązania problemu genezowania stanu maszyn. W szczególności uzyskano rozwiązanie problemów związanych z:

- a) wyborem optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych w zależności od czasu pracy maszyny i liczebności optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych;
- b) wyborem optymalnej metody genezowania wartości parametru diagnostycznego w zależności od liczebności zbioru parametrów diagnostycznych i czasu pracy maszyny;
- c) szacowaniem przyczyny stanu niezdatności maszyny stwierdzonego w chwili jej badania.

W celu zwiększenia efektywności uzyskanych rozwiązań zidentyfikowanych problemów wykonano implementację opracowanych procedur metodyki genezowania stanu maszyn w postaci programu komputerowego „Genezowanie Stanu”. Ponadto w celu zweryfikowania procedur przeprowadzono badania eksploatacyjne, gdzie na podstawie rzeczywistych przebiegów wartości parametrów diagnostycznych uzyskano dane do weryfikacji metodyki generowania stanu. Analiza wyników badań pozwoliła na opracowanie dedykowanych, dla badanych układów maszyn, reguł wnioskowania w zakresie pozyskiwania i przetwarzania wielosymptomowych macierzy obserwacji dla potrzeb wyznaczania genezy stanu maszyn poprzez szacowanie przyczyny stanu niezdatności maszyny. Umożliwia to kompleksowe rozpoznawanie stanu maszyny przez pokładowe lub stacjonarne systemy diagnostyczne, których podstawowym narzędziem, w obszarze oprogramowania, są opracowane na podstawie analizy wyników badań metodyki reguły wnioskowania diagnostycznego.

Na podstawie przedstawionych powyżej działań oraz merytorycznych wniosków szczegółowych uzyskanych na podstawie wyników badań i zamieszczonych w każdym rozdziale pracy, można sformułować wniosek ogólny.

„Zweryfikowane eksperymentalnie wyniki badań opracowanych procedur metodyki genezowania stanu maszyn jednoznacznie potwierdziły słuszość ich zastosowań do określenia przyczyny stanu niezdatności stwierdzonego podczas badania maszyny. Oznacza to, że opracowano użyteczny zaimplementowany algorytm genezowania stanu maszyn generujący dedykowane reguły wnioskowania diagnostycznego, a tym samym osiągnięto cel pracy i wykazano słuszość przyjętych tez.”

W sferze merytorycznej pracy można wydzielić trzy problemy:

1. Opracowanie procedur metodyki genezowania stanu maszyn, której efektem końcowym działania jest określenie przyczyny stanu maszyny w chwili badania $s_i(T_{LU})$.
2. Weryfikację, przy wykorzystaniu programu komputerowego „Genezowanie Stanu”, procedur metodyki genezowania stanu maszyn dla optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych opisujących ewolucję stanu maszyny podczas jej eksploatacji.
3. Opracowanie dedykowanych reguł wnioskowania diagnostycznego możliwych do wykorzystaniu przy budowie pokładowych i stacjonarnych systemów rozpoznawania stanu maszyn.

Wymienione problemy stanowią główny wątek pracy i stanowią jej zakres. Pod względem układu treści pracę można podzielić na pięć części.

W pierwszym rozdziale pracy zawarto zagadnienia związane z ewolucją stanu maszyn, opisem stanu maszyny przez optymalny zbiór parametrów diagnostycznych, identyfikacją metod genezowania i wyborem symptomowej metody genezowania stanu oraz sformułowanie założeń zadania optymalizacyjnego dla procedur genezowania stanu. Wnioski z przeprowadzonej analizy powyższych problemów pozwoliły określić tezy, cel i zakres pracy.

W rozdziale trzecim określono model genezowania stanu maszyny, w którym określono kryterium wyboru stanów maszyny, kryteria redukcji zbioru parametrów diagnostycznych opisujących ewolucję stanu maszyny w czasie eksploatacji, kryteria wyboru metod genezowania wartości parametrów diagnostycznych oraz sformułowano procedurę określania przyczyny stanu niezdatności maszyny $s_i(T_{LU})$.

W następnym rozdziale, na podstawie opracowanego modelu, opracowano algorytm genezowania stanu, co umożliwiło na opracowanie koncepcji implementacji metodyki genezowania stanu i programu komputerowego „Genezowanie Stanu”, realizującego funkcje procedur metodyki genezowania stanu w modułach (Aktywizacja Danych, Optymalizacja Parametrów Diagnostycznych, Genezowanie Stanu, Raportowanie).

W rozdziale piątym, na przykładzie przekładni zębatej samochodowej i silników spalinowych samochodów Star11422 przy wykorzystaniu programu komputerowego „Genezowanie Stanu”, zweryfikowano eksperymentalnie opracowane procedury metodyki genezowania stanu. Wyniki badań potwierdziły możliwość ich zastosowania do określenia przyczyny stanu niezdatności $s_i(T_{LU})$ oraz pozwoliły na sformułowanie dedykowanych reguł wnioskowania diagnostycznego, które w obszarze genezowania stanu maszyn mogą stanowić podstawę do opracowania oprogramowania pokładowych i stacjonarnych systemów rozpoznawania stanu maszyn.

Niektóre z przedstawionych w pracy idei wymagają dalszych badań, jednak przeprowadzona analiza wyników badań pozwala na sformułowanie następujących szczegółowych wniosków końcowych:

1. Narzędziem sterowania utrzymaniem maszyn w stanie zdatności funkcjonalnej i zadaniowej jest system rozpoznawania stanu maszyny jako istotny element systemu działania w podsystemie użytkownika i obsługiwanie maszyn.
2. Rozpoznawanie stanu maszyny w obszarze genezowania stanu jest to proces, który powinien umożliwić przewidywanie stanu maszyny w czasie przeszłym na podstawie niepełnej historii wyników badań diagnostycznych, co umożliwi oszacowanie stanu maszyny w przeszłości lub określenie przyczyny stanu maszyny stwierdzonego podczas lokalizacji uszkodzeń.
3. System rozpoznawania stanu maszyn powinien spełniać oddzielnie lub łącznie następujące funkcje:
 - a) na podstawie analizy macierzy diagnostycznej wyznaczenie testu kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń maszyny;
 - b) na podstawie genezowania wartości parametrów diagnostycznych określenie przyczyny stanu niezdatności maszyny $s_i(T_{LU})$;
 - c) na podstawie prognozowania wartości parametrów diagnostycznych wyznaczanie kolejnego terminu i zakresu obsługiwanie maszyny.
4. Realizując powyższe funkcje, w zakresie genezowania stanu maszyny wyznaczono za pomocą metody optymalizacji wielokryterialnej „punktu idealnego”, zbiory parametrów diagnostycznych, które:
 - a) jednoznacznie opisują stan maszyny,
 - b) są skorelowane ze zmianą stanu maszyny w czasie jej eksploatacji;
 - c) posiadają maksymalną ilość informacji o stanie maszyny;W celu ich wyznaczenia zbadano zbiory parametrów diagnostycznych opisujących stan techniczny układów maszyn w aspekcie możliwości ich wykorzystania w procesie genezowania stanu poprzez opracowanie metody wyboru optymalnego zbioru parametrów diagnostycznych.
5. Opracowano procedurę określenia przyczyny stanu niezdatności maszyny w chwili jej badania poprzez:
 - a) określenie optymalnej metody genezowania wartości genezowanej parametru diagnostycznego w funkcji błędu genezy;

b) określenie metody szacowania stanu niezdatności maszyny w przeszłości według kryterium minimalnej odległości wartości genezowanej parametru diagnostycznego z błędem genezy od jej wartości granicznej d_{\min} .

6. Istotnym osiągnięciem w pracy jest także opracowanie koncepcji implementacji procedur metodyki genezowania stanu maszyn w postaci programu komputerowego „Genezowanie Stanu”, który umożliwił weryfikację procedur metodyki.

Poza osiągnięciami wymienionymi powyżej, mającymi charakter ogólny można wymienić wiele osiągnięć szczegółowych ważnych ze względów poznawczych i praktycznych. Są to:

1. Opracowanie procedury optymalizacji zbioru stanów maszyny według kryterium prawdopodobieństwa uszkodzeń, która pozwoliła na identyfikację zbioru cech stanu maszyny. Stanowiło to podstawę do opracowania procedury wyboru stanów zespołów i układów maszyny.
2. Opracowanie procedury optymalizacji wielokryterialnej zbioru parametrów diagnostycznych, która pozwoliła na wyznaczenie zbioru parametrów diagnostycznych i stanowiła podstawę opracowania procedury redukcji zbioru parametrów diagnostycznych zespołów i układów maszyny.
3. Opracowanie procedury wyboru metody genezowania wartości parametrów diagnostycznych. Stanowiło to podstawę do wyznaczenia wartości parametrów diagnostycznych w przeszłości dla dowolnej wartości horyzontu genezowania wraz błędem genezy dla metod aproksymacyjnych i metod interpolacyjnych.
4. Opracowanie procedury określania przyczyny, stwierdzonego w wyniku realizacji testu kontroli stanu i lokalizacji stanu, niezdatności maszyny. Wykorzystuje ona badanie odległości minimalnej genezowanej wartości parametru diagnostycznego od wartości granicznej d_{\min} i przy założeniu różnych jej wartości szacowanie przyczyny stanu niezdatności maszyny $s_i(T_{LU})$.
5. Przeprowadzenie badań weryfikacyjnych procedur metodyki genezowania stanu maszyny w aspekcie możliwości jej wykorzystania do budowy pokładowego systemu rozpoznawania stanu, gdzie szczególnie można wyróżnić:
 - a) opracowanie programu badań w zakresie eksperymentu bierno – czynnego (samochodowa przekładnia zębata) oraz w zakresie eksperymentu biernego (silnik spalinowy samochodu Star 11422), co pozwoliło na uzyskanie zbioru stanów i zbioru parametrów diagnostycznych badanych obiektów.

- b) weryfikacja opracowanych procedur metodyki genezowania stanu maszyn, co pozwoliło na określenie przesłanek do sformułowania reguł wnioskowania w zakresie szacowania stanu maszyny w przeszłości;
- c) opis i interpretację, wyznaczonych na podstawie opracowanej metodyki genezowania stanu, reguł wnioskowania, stanowiących podstawę oprogramowania pokładowego lub stacjonarnego systemu rozpoznawania stanu maszyny.

W treści pracy występuje także wiele elementów mogących wskazywać kierunki dalszych badań nad genezowaniem stanu technicznego maszyn. Dlatego też, zdaniem autora, doskonalenie tego procesu powinno być realizowane poprzez:

- a) zwiększenie liczebności rozwiązań dopuszczalnych w zadaniu optymalizacyjnym, tzn. metod wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych i metod genezowania stanu (np. poprzez odpowiednią kompilację metod jakościowych i opracowanej metodyki genezowania stanu);
- b) weryfikację opracowanych procedur metodyki genezy stanu dla większej liczby układów maszyn o zróżnicowanym procesie zużycia (np. statków powietrznych, pojazdów mechanicznych i maszyn roboczych);
- c) podjęcie problematyki genezowania stanu procesów przemysłowych, szczególnie w aspekcie bezpieczeństwa ich realizacji;
- d) automatyzację procesu eksploatacji maszyn poprzez zaprojektowanie i skonstruowanie pokładowych lub stacjonarnych systemów rozpoznawania stanu maszyn wykorzystujących opracowaną i zweryfikowaną metodykę genezowania stanu oraz uzyskiwane, w wyniku jej realizacji, reguły wnioskowania diagnostycznego.

Wstępne prace nad stworzeniem systemów rozpoznawania stanu maszyn, wykorzystujących opracowaną w niniejszej pracy metodykę genezowania stanu maszyn, są już obecnie w kraju prowadzone, np. w postaci konstrukcji prototypów urządzeń diagnostycznych dla wybranych układów maszyn roboczych.



LITERATURA

1. Amari S., Cichocki A., Yang H.H.: A new learning algorithm for blind source separation. *Advances in Neural Information Processing Systems* 8, 757-763. MIT Press, Cambridge, MA, 1996.
2. Ameljańczyk A.: *Optymalizacja wielokryterialna*, WAT, Warszawa 1986.
3. Ayoubi M.: Fault diagnosis with dynamic neural structures and application to a turbocharger. *IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS 94*, Espoo, vol.2, 1994, pp.618-623.
4. Azovtsev A.Y., Barkov A. V., Carter D. L.: Improving the accuracy of Rolling Element Bearing Condition Assessment .*Proceedings of the 20th Annual Meeting of the Vibration Institute*, Saint Louis, Missouri, USA, 1996, pp.27-30.
5. Baillie DC., Mathew J.: Diagnosing rolling element bearing faults with artificial neural networks. *Acoustic Australia*, vol. 22, no 3 1994, pp..79-84.
6. Basseville M., Nikiforov I.V.: *Detection of Abrupt Changes - Theory and Application*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 1993.
7. Batko W.: *Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej*. *Mechanika*, z. 4. *Zeszyty Naukowe AGH*, Kraków 1984.
8. Bendat J. S., Piersol A.G.: *Metody analizy i pomiarów sygnałów losowych*, PWN, Warszawa 1976.
9. Bell A, Sejnowski T.: An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution. *Neural Computation*, 7, 1129-1159, 1995.
10. Bernal D.: *Damage Localization Using Load Vectors*, European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, Spain, 2000, pp.223-231.
11. Betz D.C.: *Application of optical fibre sensors for structural health and usage monitoring*. Dynamics Research Group, Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield. Sheffield 2004.
12. Będkowski L.: *Elementy diagnostyki technicznej*, WAT, Warszawa 1991.
13. Będkowski L., Dąbrowski T.: *Prognozowanie właściwości systemu antropotechnicznego w oparciu o trajektorie efektowe*. *Materiały I Kongresu Diagnostyki Technicznej*, Gdańsk 1996.
14. Box G., Jenkins G.: *Time series analysis, forecasting and control*, London 1970.
15. Brown R.G.: *Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series*. Prentice-Hall 1963.

16. Burnett L.: Application of artificial intelligence in machine condition monitoring. Historical Background, Feature extraction algorithms, University of Liverpool, Liverpool, 2000.
17. Calado J.M.F., Korbicz J., Patan K., Patton R.J., Sà da Costa J.M.G.: Soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems. *European Journal of Control*, vol.7, No.2–3, 2001, pp.248–286.
18. Carse B., Fogarty T.C., Munro A.: Envolving fuzzy rule based controllers using genetic algorithms. *Fuzzy Sets and Systems*, vol.80, no.3, 1996, pp.273–293.
19. Cempel Cz.: Redukcja zbioru danych w diagnostyce maszyn, *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, nr 4/1980, Warszawa 1980.
20. Cempel Cz., Bossak J., Żółtowski B.: Proste metody prognozowania stanu maszyn, *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, nr 3/1989, Kraków 1989.
21. Cempel Cz.: Theory of energy transforming systems and its application in diagnostic of systems, I Seminarium „Wibroakustyka w systemach technicznych”, Warszawa 1994.
22. Cempel C.: Ewolucyjne modele symptomowe w diagnostyce maszyn, *Materiały I Kongresu Diagnostyki Technicznej*, Gdańsk 1996.
23. Cempel C.: Multidimensional condition monitoring of mechanical systems in operation. *Mechanical systems and signals processing*, Poznań, Poland, University of Technology. 2003. str.1294 - 1301.
24. Changsen W.: Analysis of Rolling Element Bearings. *Mechanical Engineering Publications LTD*, London 1991.
25. Chen J., Paliwal K.K., Nakamura S.: Cepstrum derived from differentiated power spectrum for robust speech recognition. *Speech Communication*, vol. 41, 2003 pp. 469-484.
26. Chen J., Patton R.J.: Robust model based fault diagnosis for dynamic systems. *Kluwer Academic Publishers*, Boston 1999.
27. Cholewa W., Kaźmierczak J.: Data processing and reasoning in technical diagnostics. *WNT*, Warszawa 1995.
28. Cholewa W.: Dynamiczne systemy doradcze w diagnostyce technicznej, *Kongres Diagnostyki Technicznej*, tom I ZD SPE KBM PAN, Gdańsk 1996.
29. Cholewa W., Kiciński J.: Diagnostyka techniczna, modele odwrotne. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 1997.
30. Cholewa W.: Sieci stwierdzeń w diagnostyce technicznej. *Diagnostyka*, 38, 121-128, Olsztyn 2006.
31. Chow E.Y., Willsky A.S.: Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Trans. Aut. Contr.*, vol. 29(3), 1984, pp.603-614.

32. Comon P.: Independent component analysis - a new concept?. *Signal Processing*, 36, pp. 287-314, 1994.
33. Dyer D Stewart R. M.: Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis. *Transaction ASME. Journal of Mechanical Desing* vol.100, no.2, 1978, pp. 229-235.
34. Eriksson P.: SPM Spectrum for bearing analysis. *Proceedings of the 16th International Congress COMADEM 2003, Växjö, Sweden, 2003* pp.723-730.
35. Francois Ch.: *International Encyclopedia of Systems and Cybernetics*, K. G. Saur, Muenchen, 1997.
36. Frank P.M.: Fault diagnosis in dynamic systems via state estimations methods - a survey. In S.G. Tzafestas et al. (Eds). *System fault diagnostics, reliability and related knowledge-based approaches*, vol. 2. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht / Boston / Lancaster / Tokyo, 1987.
37. Frank P.M.: Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy. *Automatica* 26, 1990, pp.459-474.
38. Frank P.M.: Fuzzy supervision. Application of fuzzy logic to process supervision and fault diagnosis. *Int. Workshop Fuzzy Technologies in Automation and Intelligent Systems. Fuzzy Duisburg'94, Duisburg, Germany, 1994* pp.36-59.
39. Fritzen C.P., Bohle K.: *Parameter Selection Strategies in Model-Based Damage Detection, Structural Health Monitoring 2000*, Stanford University, Palo Alto, CA, 1999, pp.901-911.
40. Garcia F.J., Izquierdo V.de Miguel L., Peran J.: Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Fault Diagnosis Systems. *IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes - SAFEPROCESS '97, Kingston Upon Hull, vol. 2. 1997*, pp.705-712.
41. Gainor P.E., Kirkpatrick R.C.: *Introduction to time-series modeling and forecasting in business and economics*. New York, McGraw Hill, 1994.
42. Gertler J., Singer D.: A new structural framework for parity equation based failure detection and isolation. *Automatica*, vol. 26, no. 2, 1990, pp.381-388.
43. Gertler J.: Analytical redundancy methods in fault detection and isolation. *IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes - SAFEPROCESS'91, Baden-Baden , vol.1, 1991*, pp.9-21.
44. Gertler J.: *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker, Inc. New York - Basel - Hong Kong, 1998.
45. Gienkin M.D., Sokołowa A.G.: *Wibroakusticzeskaja diagnostika maszin i mechanizmów, Maszynostrojenije*, Moskwa 1987.

46. Greń J.: Statystyka matematyczna. PWN, Warszawa 1987.
47. Hernandez W., Evans D.: Advanced signal processing for fault detection in gearboxes with high background noise. In The TTCP Drive Train Monitoring Workshop. London, June 1991.
48. Holt C.C.: Forecasting Trends and Sesonals by Exponentially Weighted Moving Averages. ONR Memorandum, vol. 52. Carnegie Institute of Technology, 1967.
49. Hu W., Starr A.G., Zhou Z., Leung. A.: A systematic approach to integrated fault diagnosis of flexible manufacturing systems, Journal of Machine Tools & Manufacture 40, 2000, pp. 1587-1602.
50. Hyvärinen A.: Survey on independent component analysis. Neural Computing Surveys, 2, pp. 94–128, 1999.
51. Hyvärinen A., Karhunen J., Oja E.: Independent Component Analysis. John Wiley&Sons, 2001.
52. Inman D.J., Farrar C.J., Lopes V., Valder S. : Damage prognosis for aerospace, civil and mechanical systems. John Wiley & Sons, Ltd. New York 2005.
53. Isermann R.: Process fault detection based on modeling and estimation. Methods - a survey. Automatica, 20(4), 1984, pp.387-404.
54. Isermann R.: Supervision, Fault-Detection and Fault-Diagnosis Methods - An Introduction, Control Engineering Practice, vol. 5, No. 5, 1997, pp.639-652.
55. Jaźwiński J., Borgoń J.: Niezawodność eksploatacyjna i bezpieczeństwo lotów. WKŁ, Warszawa 1989.
56. Jutten C., Héroult J.: Blind separation of sources, part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture. Signal Processing, 24, pp.1-10, 1991.
57. Kalman R.E., Bucy R.S.: New Results in linear filtering and prediction theory. ASME trans. Part B (J. of Basic Eng) 83,1961.
58. Karlin C.: Osnovy teorii sluczajnych procesov. Izd. MIR, 1971.
59. Kaźmierczak J.: Zastosowanie liniowych modeli procesów losowych do prognozowania w diagnostyce maszyn. Mechanika, z. 95. Zeszyt Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1989.
60. Kiciński J.: Analiza komputerowa w diagnostyce technicznej maszyn, Kongres Diagnostyki Technicznej, tom I ZD SPE KBM PAN, Gdańsk 1996.
61. Korbicz J.: Metody sztucznej inteligencji w diagnostyce maszyn, Kongres Diagnostyki Technicznej, tom I ZD SPE KBM PAN, Gdańsk 1996.
62. Koivo H.N.: Artificial neural networks in fault diagnosis and control. Control Eng. Practice, vol.2, no.7, 1994, pp.89-101.

63. Kościelny J., M.: Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych, AOW Exit, Warszawa 2001.
64. Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (red.): Diagnostyka procesów. WNT, Warszawa 2002.
65. Köppen- Seliger B., Frank P.M.: Residual evaluation for fault detection and isolation with RCE neural networks. American Control Conference, Seattle, USA, 1995, pp.3264-3268.
66. Lee J.: Teleservice engineering in manufacturing: challenges and opportunities, International Journal of Machine Tools & Manufacture 38, 1998, pp.901–910.
67. Leonhardt S., Ayoubi M.: Methods of fault diagnosis. Control Eng. Practice, vol.5, no.5, 1997, pp.683-692.
68. Lewitowicz J.: Podstawy eksploatacji statków powietrznych, t. 2. Własności i właściwości eksploatacyjne statku powietrznego. Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2003, str. 455-496.
69. Lewitowicz J.: Podstawy eksploatacji statków powietrznych, t. 3. Systemy eksploatacji statków powietrznych. Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2006, str. 35-165.
70. Lewitowicz J.: Genezowanie zdarzeń eksploatacyjnych. Materiały konferencyjne, XXXV Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2007.
71. Ly F., Toguyeni A., Craye E.: Indirect predictive monitoring in flexible manufacturing systems. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 16, 2000, pp. 321-338.
72. Lyon R.H.: Machinery Noise and Diagnostics. Batterworths Publishers, Boston, USA 1987.
73. Macmillan R.: Assessment and control of whole - body vibration. Australia, Safety Line Institute, 1998.
74. McFadden, P.D., Smith, J.D.: Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. Journal of Sound and Vibration, 96(1), 1984, pp. 69-82.
75. McFadden, P.D., Smith, J.D.: The vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing. Journal of Sound and Vibration, 98(2), 1985 pp. 263-273.
76. Merkisz J., Mazurek S.: Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych. WKŁ, Warszawa 2002.
77. Michalski R.: Pokładowe systemy nadzoru maszyn ze sztuczna inteligencją, ART., Olsztyn 1997.
78. Michalski R., Niziński S.: Diagnostyka obiektów technicznych. Wydawnictwo ITE, Radom 2003.

79. Morel J.: Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego. PTDT, Warszawa 1994.
80. Mulawka J.: Systemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1996.
81. Muller R. J.: Bazy danych język UML w modelowaniu danych. Wydawnictwo MIKOM, Warszawa 2000.
82. Natke H.G., Cempel C.: Model – based diagnosis of systems emphasizing a holistic approach. International journal of systems sciences, vol.31, no.11. University of Hannover, Hannover, Germany, 2000, pp.1497-1504.
83. Natke H., Cempel C.: Symptom observation matrix for monitoring and diagnosis, Journal of Sound and Vibration, vol. 248, no. 4, 2001.
84. Niakas A., Petropula P.: Higher Order Spectra Analysis, A Non-linear Signal Processing Framework. Prentice Hall, 1993.
85. Niziński S.: Eksploatacja obiektów technicznych. ITE, Radom 2002.
86. Niziński S., Wierzbicki S.: Zintegrowany system diagnostyczny sterowania pojazdów. Kongres Diagnostyki, Politechnika Poznańska, Poznań 2004.
87. Ostasiewicz W. (red.): Statystyczne metody analizy danych. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej, Wrocław 1999.
88. Pachaud C., Salvetat R., Fray C.: Crest Factor and Kurtosis Contributions to Identify Defects Inducing Periodical Impulsive Forces. Mechanical Systems and Signal Processing, vol.11, no.6, 1997, pp. 903-916.
89. Pandit S.M., Wu M.S.: Time series and system analysis with applications. John Willey & Sons Inc. New York 1983.
90. Papoulis A.: Prawdopodobieństwo, zmienne losowe i procesy stochastyczne, WNT, Warszawa 1972.
91. Pfeiffer T., Komischke M.: Low-level communications systems for sensor. CIM, proceedings of 3rd CIM Europe Conference, Springer-Verlag, 1987, pp. 39-46.
92. Polska Norma PrPN-EN ISO 8178-4: Silniki spalinowe, pomiar emisji spalin, cykle badawcze silników o różnym zastosowaniu. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa 1999.
93. Razanov Ju. A.: Slučajnye processy. Izd. Nauka, 1971.
94. Russel S., Norvig P.: Artificial Intelligence: A modern Approach, Prentice Hall 1995.
95. Ruotolo R., Surace C.: Damage Detection Using Singular Value Decomposition, Proceedings of DAMAS '97, University of Sheffield, UK, 1997, pp.87-96.
96. Sempruch J., Cichański A.: Modelling of fatigue plane stress, Instituto Superior Tecnico, Proceeding of the Sixth International Conference On Biaxial/Multiaxial Fatigue & Fracture – Lisboa, Portugal, v.1, 2001, str. 223-230

97. Sempruch J.: Development in machine design and control theory. Wydawnictwa Uczelniane ATR Bydgoszcz, 2002.
98. Siler W., Buckley J. J.: Fuzzy Expert Systems and Fuzzy reasoning. John Wiley, New Jersey, 2005.
99. Smalko Z.: Podstawy projektowania niezawodnych maszyn i urządzeń. PWN. Warszawa 1972.
100. Sohn H., Farrar C.R.: Statistical Process Control and Projection Techniques for Damage Detection, European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, Spain, 2000, pp.105-114.
101. Staszewski W.J., Boller C., Tomlinson G.R.: Health Monitoring of Aerospace Structures. John Wiley & Sons, Ltd. Munich, Germany 2004.
102. Steward R.M.: Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis. Journal of Mechanical Design. Trans. of the ASME, vol.200, no.2, 1978.
103. Sturm A., Förster R.: Maschinen und Analogendiagnostik für die Zustandbezogene Instandhaltung VEB Verlag Technik, Berlin 1998.
104. Sugimoto K., Kikkawa Y.: Control systems analysis via blind source deconvolution. Proc. 4th International Symposium on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation (ICA2003), 2003.
105. Takane Y., Shibayama, T.: Principal Component Analysis with External Information on Both Subject and Variables, Psychometrica, vol. 56, pp. 97-120.
106. Takane Y., Hunter M. A.: Constrained Principal Component Analysis: A Comprehensive Theory, Applicable Algebra in Engineering Communication and Computing, Springer Verlag, no. 12, 2001, pp.391-419.
107. Theil H.: Applied economic forecasting, North-Holland, Amsterdam 1971.
108. Theil H., Wage S.: Some observations on adaptive forecasting. Management Science, vol.10, no.2, 1964.
109. Tomaszewski F.: Redukcja informacji diagnostycznej w rozpoznawaniu stanu maszyn. Diagnostyka. Vol. 26, PTDT, Olsztyn, 2002.
110. Tonshoff H.K., Wulfsberg J.R., Kals H.J., König W., Lutlert C.A.: Developments and Trends in Manufacturing and Control of Machining Processes. Annals of the CIRP, vol. 37/2/1988, pp. 611-622.
111. Toyoto T., Maekawa K.: Development and application of machine diagnostics, Nippon Steel Technical Report, no. 19, 1998.
112. Tylicki H.: Conception of the optimization of devices technical condition forecasting process. Machine Dynamics Problems, 9 (1994), Warszawa 1995.

113. Tylicki H.: Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Wydawnictwa uczelniane ATR. Bydgoszcz 1998.
114. Tylicki H., Żółtowski B.: Niezawodnościowo – diagnostyczne aspekty wyznaczania terminu kolejnego obsługiwanie. Materiały XXVII Zimowej Szkoły Niezawodności, Szczyrk 1999, t.2, 155-161.
115. Tylicki H., Żółtowski B.: The Forecasting Technical Condition of Machines. The 16th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, Cars & Fof 2000, Trynidad & Tobago, Port of Spain - St. Augustine 2000.
116. Tylicki H., Żółtowski B.: Determination methods of the next diagnosis term of transport vehicle. Archives of Transport. vol.12. Warsaw 2001.
117. Tylicki H., Żółtowski B.: Forecasting of Technical Condition of the Mechanical Vehicles. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, vol.49, Nr.2, Warsaw 2001 pp.285-300.
118. Tylicki H.: Badanie ewolucji stanu maszyn. Diagnostyka, Vol..25 Warszawa 2001, str.13-20.
119. Tylicki H.: Prognozowanie stanu maszyn. Licencjatus, tom II, Wydawnictwo PWSZ, Piła 2002, str.100-109.
120. Tylicki H.: Redukcja informacji diagnostycznej w rozpoznawaniu stanu maszyn. Diagnostyka, vol. 26, Olsztyn, 2002.
121. Tylicki H., Różycki J., Żółtowska J.: Badanie jakości zbioru sygnałów diagnostycznych. Diagnostyka, vol.32, Olsztyn 2004, str.57-62.
122. Tylicki H., Żółtowska J.: Badanie jakości diagnozy maszyn. Diagnostyka, vol.32. Olsztyn 2004, str. .63-70.
123. Tylicki H., Wilczarska J., Bartol-Smardzewska M.: Metodyka diagnozowania stanu maszyn. Wydawnictwo Oddziału PAN w Lublinie, 2005.
124. Tylicki H.: Identyfikacja procesu rozpoznawania stanu maszyny. Diagnostyka nr 5/2005.
125. Tylicki H.: Procedury badania ewolucji stanu maszyn. Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów”, Ustroń 2006.
126. Tylicki H.: Koncepcja systemu rozpoznawania stanu maszyn. XII Konferencja „Wibrotech”, Kraków 2006.
127. Tylicki H.: Procedury badania stanu maszyn w przeszłości. Materiały konferencyjne, Diagnostyka, vol.39, Olsztyn 2006.
128. Tylicki H., Wilczarska J. i inni: Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego 4T07B03326 „Opracowanie metodyki optymalizacji procesu rozpoznawania stanu maszyn”. UTP, Bydgoszcz 2007.

129. Uhl T., Barszcz T.: Informatyczne aspekty projektowania systemów monitorowania stanu maszyn – sprzęt i oprogramowanie. PTDT Diagnostyka, vol. 24, Olsztyn 2001.
130. Uhl T., Hanc A.: Rozproszone systemy monitoringu w diagnostyce maszyn. PTDT Diagnostyka, vol. 27, Olsztyn 2002.
131. Valente C., Spina D.: Crack Detection in Beam Elements Using the Gabor Transform, Proceedings of Adaptive Computing in Engineering Design and Control, 1997 pp.147-156.
132. Winters P.R.: Forecasting Scales by Exponential Weighted, Averages Moving. Management Science, 1960, vol.6, pp. 20-25.
133. Wojtuński J.: System diagnostyczny z rozmytymi regułami wnioskowania. III Konferencja nt. „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów”. PTDT, Szczyrk 1995.
134. Woropay M. i inni: Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn, Wydawnictwo ATR, Bydgoszcz 1996.
135. Yang S.M., Lee G.S.: Effects of Modeling Error on Structure Damage Diagnosis by Two-Stage Optimization, Structural Health Monitoring 2000, Stanford University, Palo Alto, CA, 1999 pp.871-880.
136. Zagdański Z.: Stany awaryjne statków powietrznych. Wydawnictwo ITWL, Warszawa 1995.
137. Zeliaś A.: Teoria prognozy, PWE, Warszawa 1984.
138. Zienkiewicz O.C., Zhu J.U.: A simple error estimation and adaptive procedure for practical engineering analysis. International Journal for Numerical Methods in Engineering., vol. 24 (1987), pp. 337-357.
139. Żółtowski B.: Eksperymenty diagnostyki technicznej. Diagnostyka maszyn, MCNEMT, Radom, 1992.
140. Żółtowski B.: Energetyczna ocena charakterystyk eksploatacyjnych silników spalinowych. Materiały konferencyjne, Diagnostyka'99, KMRiP, ATR, 1999.
141. Żółtowski B.: Formalne aspekty rozpraw naukowych. Materiały konferencyjne – Forum Młodych 2000, Bydgoszcz – Borówno, 2000.
142. Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 1996.
143. Żółtowski B., Ćwik Z.: Leksykon diagnostyki technicznej. Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz, 1996.
144. Żółtowski B.: Wybrane problemy diagnostyki drganiowej w praktyce przemysłowej. Materiał konferencyjne, Ogólnopolskie Sympozjum, Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 1997.

145. Żółtowski B., Tylicki H.: Forecasting of technical condition of the mechanical vehicles. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, vol. 49, No2, 2001, pp.285-300.
146. Żółtowski B.: Badania dynamiki maszyn. Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 2002, 337p. ISBN 83-916198-3-4.
147. Żółtowski B., Cempel C.: Inżynieria diagnostyki maszyn. Warszawa: Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji, 2004.
148. Żółtowski B., Castaneda L.: Portable diagnostic system for the metro train. Diagnostyka, nr 1(37), Olsztyn 2006, str.39-44.
149. Żółtowski B.: Diagnostic system for the metro train. ICME, Science Press, Chengdu, China, 2006, str. 337-344.
150. Żółtowski B., Castaneda L.: Sistema Portail de Diagnostico para el Sistema Metro de Medellin. VIII Congreso International de Mantenimiento, Bogota, Columbia 2006.

Biblioteka Główna UTP w Bydgoszczy

D 329

