ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985
Seria: ENERGETYKA z. 89 Nr kol. 841

Jerzy Pokojski, Jerzy Wróbel
Instytut Podstaw Budowy Maszyn
Politechnika Warszawska

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROCESÓW DECYZYJNYCH W DYNAMICE MASZYN

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodykę rozwiązania problemów decyzyjnych w dynamice maszyn w warunkach określoności i w warunkach losowości. Jako problem przykładowy rozpatrzono w zadanie optymalnego doboru parametrów zawieszenia pojazdu.

1. Wstęp

Wykorzystanie systemów cyfrowych w dynamice maszyn umożliwia dobór charakterystyk dynamicznych projektowanych maszyn [3], [7], [12] /z uwzględnieniem jednego lub wielu kryteriów optymalizacji/, a także umożliwia badanie bardziej złożonych modeli matematycznych, lepiej opisujących dynamikę istniejących bądź projektowanych maszyn [3], [6], [7], [12] /do opisu wprowadza się elementy losowe, nieliniowości; same problemy rozwiązuje się jednak wtedy często kosztowną metodą symulacji cyfrowej/.

Obie te tendencje mają jeden wspólny mianownik - jest nim rosnący koszt obliczeń numerycznych. Przy bardziej rozbudowanej próbie opisu zjawisk dynamicznych może się okazać, że duży problem dynamiki maszyn w powiązaniu z optymalizacją wielokryterialną potraktowany globalnie jest bardzo kosztowny obliczeniowo. Zachodzi więc potrzeba opracowania takiego podejścia, które wykorzystując specyfikę dziedziny, jaką jest dynamika maszyn oraz aktualny stan wiedzy z tego zakresu, pozwoliłoby na uzyskanie akceptowalnych /polioptymalnych/ charakterystyk dynamicznych przy zdecydowanie mniejszym nakładzie obliczeniowym.

Przykładem takiego dużego zadania polioptymalizacji w dynamice maszyn jest problem polioptymalnego doboru charakterystyk zawieszenia pojazdu. Kryteriami przy tego typu zadaniach są na ogół wskaźniki związane z poprawą komfortu i bezpieczeństwa jazdy [4]. Należy jednak zwrócić uwagę, że warunki pracy zawieszenia pojazdu mogą być bardzo różne, np.: różne wymuszenia zewnętrzne głównie jako konsekwencje różnych rodzajów nawierzchni /mogą mieć charakter zdeterminowany lub losowy/, zmieniające się wartości parametrów układu /np.: masa resorowana, która może być traktowana jako zmienna losowa/, różne prędkości jazdy, różne rodzaje ruchu /np.: jazda ze stałą prędkością, hamowanie, rozpędzanie/. Problem przedstawiony powyżej należałoby potraktować jako jedno duże zadanie i rozwiązywać całościowo. Niemniej jednak korzystniej jest głębiej wniknąć w jego specyfikę i to zarówno od strony modelowej /wykorzystując pewne słabsze powiązania strukturalne do jego dekompozycji [12] /, jak i optymalizacyjnej /zastosować świadomie dobrane koncepcje rozwiązania polioptymalnego [6] /. Przemawiają za tym następujące fakty: jeżeli weźmiemy pod uwagę dwa kryteria jakości dla ustalonej prędkości jazdy, ustalonego typu oddziaływań zewnętrznych i ustalonego rodzaju ruchu i następnie dokonamy polioptymalnego doboru charakterystyk zawieszenia, to w efekcie zostanie wyznaczone jedno najbardziej preferowane, polioptymalne rozwiązanie zależne od uprzednio ustalonych parametrów. Zestawiając różne kombinacje tych parametrów uzyskuje się cały zbiór zadań cząstkowych, które niekoniecznie prowadzą do równoważnych wyników - charakterystyk zawieszenia [4] . Rozwiązanie tego konfliktu może nastąpić na drodze wypracowania kompromisu pomiędzy zadaniami cząstkowymi /przypadek klasycznego pasywnego zawieszenia/ lub też poprzez taką fizyczną realizację układu dynamicznego, która umożliwiałaby zmianę jego charakterystyk w trakcie jego pracy /przypadek zawieszenia aktywnego/. W pracy omówiono poszczególne etapy rozwiązania tej klasy problemów.

2. Sformułowanie problemu

2.1. Zmienne decyzyjne, obszar dopuszczalny

Przy budowie modelu matematycznego, opisującego dynamikę istniejącej bądź projektowanej maszyny, istotnym elementem jest [7] ustalenie wektora zmiennych decyzyjnych $\underline{x} = (x_1,\dots,x_m)$. Założono, że wektor zmiennych decyzyjnych $\underline{x}$ jest elementem n-wymiarowej przestrzeni euklidesowej, a więc poszczególne zmienne decyzyjne będące współczynnikami charakterystyk dynamicznych /mogą być nieliniowe, ale o zadanej postaci nieliniowości/ są liczbami należącymi do pwnych przedziałów zmienności. Jeżeli zadana jest struktura układu, to równania stanu można zapisać w postaci [6]:

$$\frac{dy_i}{dt} = f_i\,(t,y_1,\dots,y_s,x_1,\dots,x_m,\quad \lambda_1,\dots,\lambda_L,w_1,\dots,w_k)$$

$$y_i\,(t_o) = y_{io}\;;\quad i = 1,2,\dots,s \qquad /1/$$

gdzie: $y_1,\dots,y_s$ - zmienne stanu,
$x_1,\dots,x_m$ - zmienne decyzyjne,
$\lambda_1,\dots,\lambda_L$ - parametry modelu /mogą to być zmienne losowe/,

$y_{i1},\ldots,y_{is}$ - warunki początkowe /mogą być losowe/,
$w_1,\ldots,w_k$ - oddziaływania zewnętrzne /mogą to być funkcje losowe/,
$f_1,\ldots,f_s$ - pewne, w ogólności nieliniowe funkcje.

2.2. Kryteria jakości

Jeżeli model matematyczny jest zdeterminowany /bez wielkości losowych/ to zdeterminowany jest też charakter kryteriów jakości stosowanych w dynamice maszyn. Często jako wskaźniki jakości przyjmuje się maksymalne wartości poszczególnych zmiennych stanu lub maksymalne wartości pewnych funkcji tych zmiennych, w pewnym przedziale czasu całkowania równań stanu /1/:

$$q_1 = \max_{t\in[t_o,T]} y_i(t)$$

$$q_2 = \max_{t\in[t_o,T]} g(y_1,\ldots,y_s) \qquad /2/$$

W wielu zadaniach wskaźniki jakości przyjmują postać całkową /jest to na przykład czas rozproszenia przez układ zadanej energii lub całka z kwadratów przemieszczeń pewnych zmiennych stanu lub funkcji tych zmiennych/:

$$q_3 = \int_{t_o}^{T} y_i^2(t)\,.\,dt \qquad /3/$$

$$q_4 = \int_{t_o}^{T} q(y_1,\ldots,y_s)\,dt$$

Obliczanie takich wskaźników jakości jest dla modeli liniowych /opisywanych liniowymi równaniami stanu/ zadaniem dosyć prostym, niemniej dla modeli nieliniowych poza przypadkami szczególnymi jest to zadanie złożone i praktyczną metodą badawczą jakości takich układów staje się technika symulacji cyfrowej [7].

W przypadku modeli losowych /z wielkościami losowymi/ inne muszą być kryteria jakości układu. Często wskaźniki jakości określa się w postaci wartości średnich lub wariancji pewnych zmiennych stanu czy też pewnych funkcji zmiennych stanu:

$$q_5 = E\left[y_i(t)\right]$$

$$q_6 = E\left[g\left(y_1,\ldots y_s\right)\right]$$
$$q_7 = D\left[y_i(t)\right] = E\left[y_i(t) - E\left[y_i(t)\right]^2\right] \qquad /4/$$
$$q_8 = D\left[g\left(y_1,\ldots,y_s\right)\right]$$

Coraz silniej zaznacza się jednak tendencja do stosowania jako funkcjonałów jakości pewnych prawdopodobieństw. Wskaźnik jakości określa się wtedy jako prawdopodobieństwo znalezienia się pewnych zmiennych stanu lub pewnych zmiennych stanu lub pewnych funkcji tych zmiennych wewnątrz zadanych przedziałów w określonej chwili, bądź przedziale czasu [7]:

$$q_9 = P\left\{\omega:\ a_i(t) \le y_i(t) \le b_i(t)\ ;\ i = 1,\ldots,s\right\}$$
$$q_{10} = P\left\{\omega:\ a_j(t) \le g_j(y_1,\ldots,y_s) \le b_j(t);\ j = 1,\ldots,r\right\} \qquad /5/$$

Obliczanie wskaźników jakości dla modeli losowych jest bardziej złożone niż dla modeli zdeterminowanych, niemniej jednak dla modeli liniowych istnieje cały szereg efektywnych metod obliczania wskaźników o postaci /4/, /5/. W pracach [4, 7, 8] przedstawiono szereg przykładów badania jakości liniowych modeli matematycznych, opisujących stochastyczną dynamikę maszyn. Badanie jakości w nieliniowej stochastycznej dynamice maszyn jest zadaniem znacznie trudniejszym i poza przypadkami szczególnymi jedną z bardziej efektywnych metod badania jakości jest technika symulacji cyfrowej [7].

2.3. Definicja rozwiązania polioptymalnego

Zadania podejmowania decyzji w dynamice maszyn są na ogół zadaniami wielokryterialnymi [6, 7, 8, 9, 10, 12], a wielokryterialność stwarza możliwość wystąpienią konfliktów pomiędzy niekooperującymi kryteriami. Konflikty te rozstrzyga decydent zgodnie z własnymi preferancjami [1, 2]. W przypadku, gdy kryteria są jedynie funkcjami wielkości zdeterminowanych, problem jest określany mianem problemu podejmowania decyzji w warunkach określoności [13]. W przypadku, gdy występują zarówno wielkości zdeterminowane, jak i losowe, problem określa się jako podejmowanie decyzji w warunkach losowości [13]. Problem podejmowania decyzji w warunkach określoności [13] polega na tym, że każda dopuszczalna wartość wektora zmiennych decyzyjnych $\underline{x} \in \Phi$ /Φ - obszar dopuszczalny/ wywołuje następstwa, które mogą być ściśle określone:

$$q_i :: \Phi \longrightarrow R^1\ ;\ i = 1,\ldots,n \qquad /6/$$

$$\underline{Q}\,(q_1,\dots,q_m): \Phi \rightarrow R^m$$

Problem podejmowania decyzji w warunkach losowości [13] wymaga innego określenia wielkości wejściowych, bowiem poza zbiorem Φ występuje zbiór Ω / Ω – zbiór zdarzeń/. Zbiór możliwych wartości wielkości wejściowych można określić jako produkt kartezjański $\Phi \times \Omega$. Po uwzględnieniu funkcji celu uzyskuje się następującą postać problemu:

$$q_i \;: \Phi \times \Omega \rightarrow R^1 \;;\; i = 1,\dots,n \qquad /7/$$
$$\underline{Q} \;: \Phi \times \Omega \rightarrow R^n$$

Zadanie podejmowania decyzji w obu powyższych przypadkach polega na wyznaczaniu rozwiązań polioptymalnych w sensie pareto, zgodnych z preferencjami decydenta. W przypadku problemu w warunkach losowości można określić rozwiązanie polioptymalne w dwojaki sposób /minimalizacja/ [1]:

a/ wektor zmiennych decyzyjnych $\underline{x}' \in \Phi$ dominuje wektor $\underline{x}'' \in \Phi$, jeżeli dla każdego $\omega \in \Omega$ jest spełnione $q_i(\underline{x}', \omega) \leq q_i(\underline{x}'', \omega)$ $i = 1,\dots,n$, a przynajmniej dla jednego i zachodzi nierówność ostra. Wektor zmiennych decyzyjnych jest polioptymalny w sensie pareto, jeżeli nie ma innego wektora zmiennych decyzyjnych, który by go dominował,

b/ zakłada się możliwość istnienia miary probabilistycznej μ na zbiorze Ω. Każdemu wektorowi zmiennych decyzyjnych $\underline{x} \in \Phi$ można przyporządkować zmienną losową $F(\underline{x}, \cdot)$.
Jako funkcję celu przyjmuje się wówczas określone charakterystyki $F(x, \cdot)$. Bardzo często są to: wartość przeciętna, wariancja. Zbiór rozwiązań polioptymalnych definiowany jest na określonych miarach jakości w sposób klasyczny.

Problem polioptymalizacji w warunkach losowości można więc rozwiązać za pomocą następujących podejść [13]:

I/ W przypadku skończonego zbioru $\Omega = \{\omega_1,\dots,\omega_m\}$ można utworzyć $n \cdot m$ funkcji celu $q_{ij} : \Phi \rightarrow R^1$;
$q_{ij}\,\underline{x} = q_i\,\underline{x}\;{}_j$; $i = 1,\dots,n$; $j = 1,\dots,m$.

II/ Każdą funkcję celu $q_i : \Phi \times \Omega \rightarrow R^1$ można przekształcić do postaci $G_i : \Phi \rightarrow R^1$ i dalej rozwiązywać jak w warunkach określoności.

III/ Z wykorzystaniem funkcji użyteczności. Zadanie polega na:

$$\max_{\underline{x} \in \Phi} U(\underline{x}) \;;\; U(\underline{x}) = \int_{\Omega} u(Q(\underline{x}, \cdot))\, d\mu \;;\; u : R^n \rightarrow R^1;\; \underline{x} \in \Phi \qquad /8/$$

gdzie: u jest ściśle monotoniczną ciągłą funkcją, nazywaną funkcją użyteczności, $U(\cdot)$ jest jej wartością przeciętną.

Sposób I umożliwia rozwiązywanie zadań o niewielkim zbiorze Ω i można go stosować w przypadku układów o losowych odchyleniach parametrów.

Sposób II pozwala na badanie dynamiki maszyn w przypadku układów z losowym wymuszeniem [8, 9]. Podejście mieszane, oparte na skojarzeniu sposobów I i II zostanie przedstawione w przykładzie z rozdz. 3.3.Sposób III wymaga oszacowania funkcji użyteczności określonego decydenta [5].

2.4. Dobór metod polioptymalizacji

W literaturze można spotkać szereg prób klasyfikacji metod polioptymalizacji. Przesłanki, na których oparte są poszczególne klasyfikacje są niekiedy bardzo różne. Podział, który z punktu widzenia możliwości wykorzystania w dynamice maszyn uznano za najbardziej interesujący, pochodzi z pracy Hwanga Ch.L.Masuda A.S.[1]. Przesłankami służącymi do klasyfikacji są: rodzaj, ilość oraz moment dostarczania informacji przez decydenta w stosunku do procesu minimalizacji kryteriów. Podział powyższy ma w zastosowaniach w dynamice maszyn poważne praktyczne implikacje. Możliwości decyzyjne decydenta, możliwości zapewnienia wymaganych informacji determinują wybór metody. Ilość uzyskanych informacji zależy od wyboru metody. Wybór metody ograniczony jest kosztem obliczeń. W klasyfikacji metod polioptymalizacji [1] wyodrębnia się trzy następujące grupy: 1/ metody aprioryczne, 2/ metody, w których decydent przedstawia swoje preferencje progresywne, 3/ metody, w których preferencje decydenta są określone a posteriori.Uporządkowanie grup metod w kolejności 1/,2/, 3/ oznacza wzrost ilości uzyskiwanych informacji, rosnący koszt obliczeń, malejącą rolę decydenta we wcześniejszych fazach obliczeń. Trzy powyższe czynniki: ilość uzyskiwanych informacji, koszt obliczeń, wola decydenta są podstawowymi, które wyznaczają zbiór możliwych do zastosowania w danym przypadku metod.

3. Przykład polioptymalnego doboru charakterystyk dynamicznych zawieszenia pojazdu

3.1. Sformułowanie zadania

Rozwiązanie dużego problemu dynamiki maszyn może nastąpić poprzez stopniowe rozwiązywanie problemów cząstkowych. Problemy cząstkowe, jak stwierdzono we wstępie, mogą mieć różny charakter, mogą być liniowe i nieliniowe, przy zdeterminowanych i losowych oddziaływaniach zewnętrznych, przy losowych i zdeterminowanych parametrach, mogą dotyczyć jazdy ze stałą lub zmienną prędkością. W dalszej części pracy przedstawiono trzy przykłady,pierwsze dwa dotyczą zadań cząstkowych, trzeci przedstawia próbę podejścia kompleksowego, prowadzącego do postaci zdekomponowanej.

3.2. Badanie liniowego modelu zawieszenia z uwzględnieniem stacjonarnych wymuszeń losowych i dwóch kryteriów jakości [8]

Celem przykładu jest polioptymalizacja losowego dynamicznego modelu zawieszenia o dwóch stopniach swobody z uwzględnieniem kinematycznego stochastycznego oddziaływania zewnętrznego od nierówności drogi. Równania ruchu układu są następujące:

$$m_1\ddot{y}_1 + k_1(y_1 - y_2) + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0$$
$$m_2\ddot{y}_2 + k_1(y_2 - y_1) + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2(y_2 - q) + c_2(\dot{y}_2 - \dot{q}) = 0, \quad /9/$$

gdzie: m_1, m_2 - masa resorowana i nieresorowana; k_1, k_2 - współczynniki sztywności zawieszenia i ogumienia; c_1, c_2 - współczynniki tłumienia zawieszenia i ogumienia; y_1, y_2 - przemieszczenia części resorowanej i nieresorowanej; q - wymuszenia kinematyczne od nierówności drogi.

Problem polioptymalizacji zawieszenia jest następujący:

$$\min_{(k_1, c_1) \in \Phi} \left(\sigma^2_{y1-y2}, \sigma^2_{\ddot{y}_1} \right) \quad /10/$$

- kryteria:

$\sigma^2_{y_1-y_2}$ **- wariancja różnicy przemieszczeń ciał o masach m_1, m_2**

$\sigma^2_{\ddot{y}_1}$ **- wariancja przyśpieszeń ciała o masie m_1**

- zmienne decyzyjne:

k_1 **- współczynnik sztywności**

c_1 **- współczynnik tłumienia**

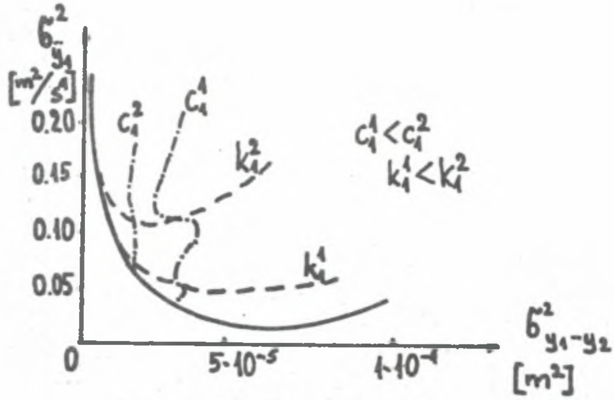
- ograniczenia:

$$k_1 \in [k_{1\,min}, k_{1\,max}]$$
$$c_1 \in [c_{1\,min}, c_{1\,max}]$$

Obliczeń dokonano dla następujących danych:

k_1 = 10000 ÷ 50000 N/m; krok = 2000 N/M; c_1 = 0 ÷ 5000 Ns/m krok = 250 Ns/m; k_2 = 300000 N/m; c_2 = 0; m_1 = 600 kg; m_2 = 96 kg; v = 18 m/s.

Wymuszeniem był mikroprofil drogi asfaltowej /dane zaczerpnięto z [3] rys. 3.10 str. 61 ozn. E/. Wyniki przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wyniki przykładu

Problem został rozwiązany wg sposobu II /rozdz. 2.3/.

3.3. Badanie nieliniowego modelu zawieszenia z uwzględnieniem losowych oddziaływań zewnętrznych i parametrów [6]

Celem przykładu jest dobór nieliniowej asymetrycznej charakterystyki amortyzatora w zawieszeniu pojazdu zamodelowanego za pomocą układu nieliniowego o dwu stopniach swobody, z uwzględnieniem losowych oddziaływań na nierówności drogi i losowych odchyleń masy resorowanej.

Równania ruchu układu są następujące:

$$M\ddot{y}_1 + F + k\left(y_1 - y_2\right) = 0$$
$$m\ddot{y}_2 - F - k\left(y_1 - y_2\right) + c_0\left(\dot{y}_2 - \dot{q}(t)\right) + k_0\left(y_2 - q(t)\right) = 0, \qquad /11/$$

gdzie: m,M - masa nieresorowana i resorowana; k,k_0 - sztywność na resorze i ogumieniu; c_0 - tłumienie w ogumieniu; y_1,y_2 - przemieszczenie części resorowanej i nieresorowanej; q t - wymuszenie kinematyczne od nierówności drogi; F - siła tłumienia w amortyzatorze równa:

$$F = \begin{cases} r\left(\dot{y}_1 - \dot{y}_2\right) ; & \left(\dot{y}_1 - \dot{y}_2\right) \geq 0 ; \\ c\left(\dot{y}_1 - \dot{y}_2\right) ; & \left(\dot{y}_1 - \dot{y}_2\right) < 0 ; \end{cases} \qquad /12/$$

gdzie: r,c - wielkości określające charakterystykę amortyzatora i będące zmiennymi decyzyjnymi w przykładzie.

Arbitralnie założono, że masa resorowana składa się z części stałej M_0 i losowej M_R

$$M = M_0 + M_R \qquad /13/$$

Masa M_o obejmuje obciążenie pojazdu, które występuje zawsze. O masie M_R założono, że ma rozkład Rayleigha oraz przyjęto, że średnia zmiennej losowej M_R oraz masa M_o dadzą w sumie obciążenie nominalne, przyjmowane zwykle do obliczeń. Wymuszenie kinematyczne przyjęto jako realizację ergodycznego, stacjonarnego, normalnego procesu o gęstości widmowej typowej dla drogi asfaltowej [7] . W procesie doboru charakterystyk amortyzatora przyjęto dwa kryteria jakości:

$$q_1 = \{\omega : |\ddot{y}_1| \geqslant a\} ;$$
$$q_2 = \{\omega : |y_1 - y_2| \geqslant b\} . \qquad /14/$$

Kryterium q_1 określa prawdopodobieństwo tego, że przyśpieszenia masy resorowanej przekroczą dopuszczalny poziom, a kryterium q_2 określa natomiast prawdopodobieństwo tego, że ugięcia względne resoru przekroczą dopuszczalny zakres b. Kryterium q_1 świadczy więc o komforcie jazdy, a kryterium q_2 świadczy o bezpieczeństwie. Do obliczenia kryteriów /14/ zastosowano metodę symulacyjnego badania jakości opisaną w [7].

Wiele problemów dynamiki maszyn, w tym rozważany przykład, odznacza się stosunkowo małą podatnością na użycie klasycznych algorytmów programowania nieliniowego. [W] związku z tym celowe jest podejście z użyciem metod wieloatrybutowego podejmowania decyzji /Multiple Atribute Decision Making - MADM/ [1, 2]. Metody i podejście należące do tej grupy służą do porówynwania i wariantowania przeliczalnego i na ogół niewielkiego zbioru alternatyw. Przykład rozwiązano przy tego typu podejściu. Ze względu na niewielką liczbę /trzy/ alternatyw wziętych pod uwagę ograniczono się do wyznaczenia z definicji zbioru rozwiązań polioptymalnych. W przykładzie losowe jest wymuszenie od drogi oraz losowo zmienia się parametr układu: masa resorowana.

Jeżeli wyodrębnić z zadania podproblem polegający na uwzględnieniu jedynie losowego wymuszenia, to problem można rozwiązać według sposobu II z podrozdziału 2.3. Zmienne decyzyjne: wielkości deterministyczne r, c oraz oddziaływania losowe i realizacja procesu stochastycznego są odwzorowywane na elementarną miarę probabilistyczną: prawdopodobieństwo pewnego zdarzenia. Przy czym prawdopodobieństwa zmieniają się w zależności od wartości wektora zmiennych decyzyjnych, natomiast losowość jest traktowana globalnie. W przypadku uwzględnienia losowości masy resorowanej przyjęto, że możliwych jest m zdarzeń $\Omega = \{\omega_1, \ldots, \omega_m\}$, które generowano losowo zgodnie z przyjętym rozkładem.

Do rozwiązania całego problemu zastosowano dwa podejścia. Pierwsze jest to sposób I w powiązaniu z II /z podrozdziału 2.3/. Wyznaczanie zbioru punktów polioptymalnych odbywało się jak w warunkach określoności. Sposób I został zastosowany w stosunku do losowego odchylenia parametrów. Sposób II zastosowano w stosunku do losowego wymuszenia. Zatem wynik końcowy:-wartości funkcji kryterialnych były funkcją zarówno wektora zmiennych decyzyjnych (r, c), jak i zdarzenia ω_i. Drugie podejście polegało na uśrednieniu wyników ze względu na oba oddziaływania losowe. Zatem był to sposób II z podrozdziału 2.3. Wynik końcowy był wyłącznie funkcją wektora zmiennych decyzyjnych (r, c).

Rozważono dwa zestawy danych. W pierwszym wzięto pod uwagę trzy alternatywy. Zbiór Ω składał się z 11 elementów. Wyniki w przestrzeni kryterialnej dla przypadku użycia sposobu II przedstawiono na rys. 2a /numery na rysunku oznaczają numery alternatyw/. Wyniki w przypadku zastosowania sposobu mieszanego, tj. I i II, przedstawiono na rys. 2.b. Skorzystano z faktu równoważności podejścia I oraz z pierwszej definicji zbioru punktów polioptymalnych i wyniki przedstawiono w przestrzeni 2-wymiarowej. Przyjęto następujący sposób oznaczania punktów: pierwsza liczba oznacza numer alternatywy, druga liczba - numer zdarzenia.

W drugim zestawie danych rozpatrzono dwie alternatywy. Zbiór Ω składał się z 6 elementów. Wyniki w przypadku sposobu II przedstawiono na rys. 3.a, dla sposobu mieszanego przedstawiono na rys. 3.b. Zachowano ten sam sposób oznaczania co poprzednio. Należy zauważyć, że w przypadku sposobu II alternatywa 2 dominuje nad alternatywą 1. Natomiast w przypadku mieszanym żądana alternatywa nie dominuje nad drugą. Powyższy przypadek świadczy o tym, że w pewnych sytuacjach sposoby I i II nie prowadzą do równoważnego porządkowania alternatyw. Dobór definicji punktu polioptymalnego ma bezpośredni wpływ na uzyskane wyniki; musi wynikać z całokształtu modelowanej sytuacji decyzyjnej.

3.4. Przykład kompleksowego podejścia prowadzącego do zadania zdekomponowanego

Przedstawiona we wstępie koncepcja doboru charakterystyk zawieszenia przy różnych warunkach jazdy zostanie przedstawiona na przykładzie dwóch następujących problemów cząstkowych:

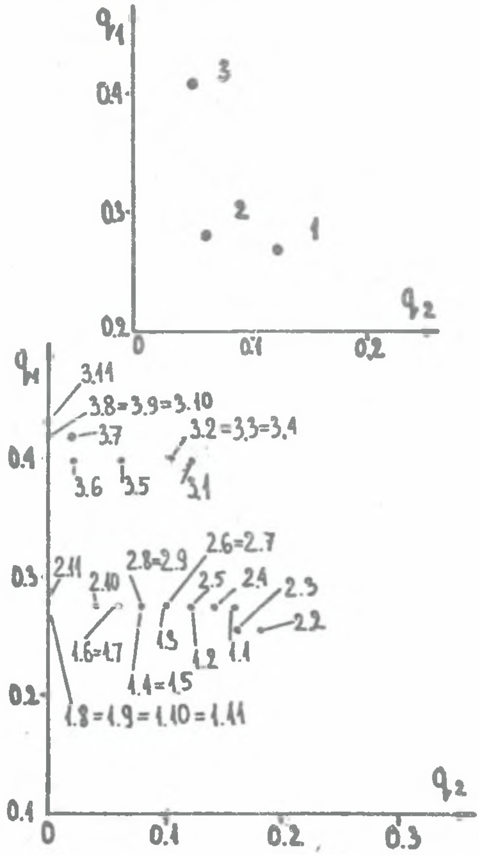
1/ jazda po szosie ze stałą prędkością,

2/ przejazd przez przeszkodę.

W przypadku jazdy szosowej założono liniową postać charakterystyk i równania ruchu są wtedy następujące:

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 + k_1(y_1 - y_2) + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0 \\ m_2\ddot{y}_2 + k_1(y_2 - y_1) + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2(y_2 - q) + c_2(\dot{y}_2 - \dot{q}) = 0, \end{cases} \qquad /15/$$

gdzie: m_1, m_2 są masami części resorowanej i nieresorowanej pojazdu, y_1, y_2 - przemieszczaniami części resorowanej i nieresorowanej pojazdu; k_1 - jest współczynnikiem sztywności zawieszenia; c_1 - współczynnikiem tłumienia w zawieszeniu; k_2 - współczynnikiem sztywności opony; c_2 - współczynnikiem tłumienia opony; q - wymuszeniem kinematycznym pochodzącym od losowych nierówności drogi.



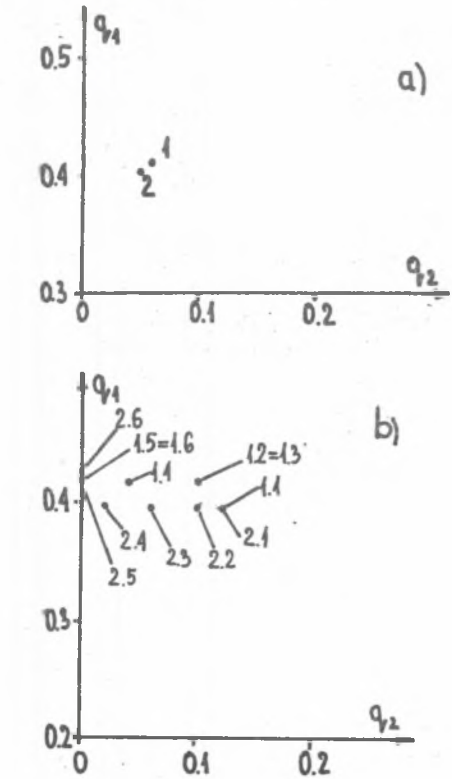
Rys. 2. Wyniki w przestrzeni kryterialnej dla drugiego zestawu danych w przypadku zastosowania
a/ sposobu II; b/ sposobu mieszanego

Założono, że wymuszeniem jest stacjonarny proces stochastyczny o zerowej wartości średniej i znanej gęstości widmowej.

Zmiennymi decyzyjnymi są k_1 i c_1, a zbiór dopuszczalny Φ określono za pomocą kostki zmienności

$$\Phi = \left\{(k_1, c_1) \; : \; k_{1min} \leq k_1 \leq k_{1max}; \; c_{1min} \leq c_1 \leq c_{1max}\right\} \qquad /16/$$

Przyjęto dwa wzajemnie sprzeczne kryteria optymalizacji; wariancję różnicy przemieszczeń czę stości resorowanej i nieresorowanej /jest to wariancja ugięć względnych resoru/ oraz wariancję przyśpieszeń części resorowanej. Wskaźnik pierwszy decyduje o bezpieczeństwie ruchu, a drugi o komforcie jazdy.



Rys. 3. Wyniki w przestrzeni kryterialnej dla drugiego zestawu danych w przypadku zastosowania a/ sposobu II, b/sposobu mieszanego

Problem polioptymalizacji przy jeździe szosowej jest więc następujący:

$$\min_{(k_1,c_1)\in\Phi}\left(\sigma^2_{y1-y2},\ \ddot{y}^2_1\right) \qquad /17/$$

W przypadku przejazdu przez przeszkodę przyjęto podobny model zawieszenia, z tą różnicą, że w charakterystyce sprężystej resoru uwzględniono możliwość uderzenia w ogranicznik, przy znacznym ugięciu względnym. Równania ruchu są następujące:

$$m_1\ddot{y}_1 + F + c_1\left(\dot{y}_1-\dot{y}_2\right) = 0 \qquad /18/$$

$$m_2\ddot{y}_2 - F + c_1\left(\dot{y}_2-\dot{y}_1\right) + k_2\left(y_2-q\right) + c_2\left(\dot{y}_2-\dot{q}\right) = 0,$$

gdzie: m_1, m_2, y_1, y_2, c_1-oznaczają te same wielkości co w przykładzie poprzednim;
F jest siłą sprężystą wynikającą z ugięcia resoru i równą:

$$F = \begin{cases} k_0\left(y_1-y_2\right) + \left(k_0-k_1\right) a & \text{dla } \left(y_1-y_2\right) \leqslant -a \\ k_1\left(y_1-y_2\right) & \text{dla } \left|y_1-y_2\right| < a \\ k_0\left(y_1-y_2\right) + \left(k_1-k_0\right) a & \text{dla } \left(y_1-y_2\right) \geqslant a \end{cases} \qquad /19/$$

Wymuszenie przyjęto w postaci pojedynczej fali harmoniki.

Zmiennymi decyzyjnymi są k_1, k_0, c_1, a zbiór dopuszczalny Φ^* określono w następujący sposób:

$$\Phi^* = \left\{\left(k_1, k_0, c_1\right) : k_{1min} \leqslant k_1 \leqslant k_{1max};\ k_{0min} \leqslant k_0 \leqslant k_{0max};\ c_{1min} \leqslant c_1 \leqslant c_{1max}\right\} \qquad /20/$$

Przyjęto następujące kryteria optymalizacji: maksymalne ugięcie względne resoru jakie wystąpiło w czasie przejazdu przez przeszkodę i maksymalne przyśpieszenia części resorowanej pojazdu. Podobnie jak w poprzednim przypadku wskaźnik pierwszy decyduje o bezpieczeństwie ruchu, a drugi o komforcie jazdy.

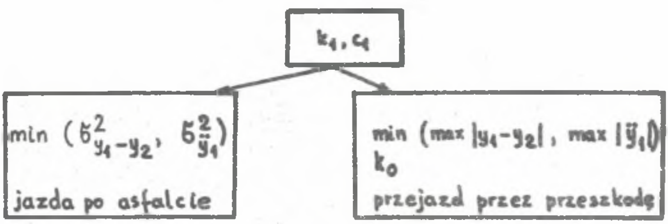
Problem polioptymalizacji przy przejeździe przez przeszkodę jest więc następujący:

$$\min_{(k_1,k_0,c_1)\in\Phi} \left\{ \max_{t\in[0,T]} |y_1(t) - y_2(t)|, \max_{t\in[0,T]} |\ddot{y}_1(t)| \right\} \quad /21/$$

W pierwszym przypadku /jazda po asfaltowej szosie/ przejazd odbywał się z prędkością 72 km/h 20 m/s , a w drugim z prędkością 0,75 m/s przez przeszkodę o długości 1 m i wysokości 0,1 m. Czas przejazdu T = 0,75s.

W pierwszym zadaniu do obliczania wartości kryteriów wykorzystano związki analityczne, przedstawione w [8] , a do obliczania wartości kryteriów w drugim zadaniu skorzystano z metody symulacji cyfrowej [7].

Problem doboru zawieszenia rozpatrywany jako całość obu zadań można przedstawić jak na rys. 4.



Rys. 4. Schemat problemu polioptymalizacji zawieszenia

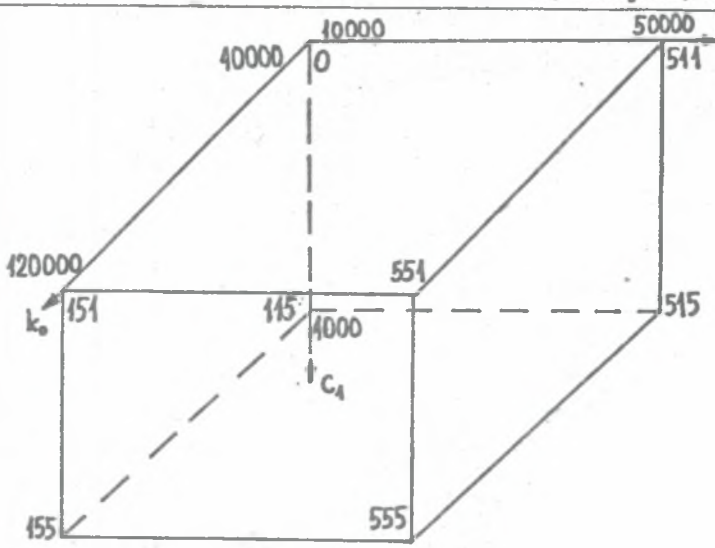
Problem ma poziomową strukturę; występują zmienne koordynacyjne wspólne dla obu zadań k_1, c_1 oraz jedna zmienna lokalna k_0, w drugim zadaniu.Każde z zadań ma dwa wzajemnie sprzeczne kryteria. Występuje też hierarchia konfliktów, pierwszy poziom to konflikty wewnątrzzadaniowe pomiędzy kryteriami

$$\left(\sigma^2_{\ddot{y}1},\ \sigma^2_{y1-y2}\right) \quad \text{oraz} \left(\max\ |y_1-y_2|\ ,\ \max\ |\ddot{y}_1|\right), \text{ drugi}$$

wyższy to konflikty pomiędzy obu zadaniami. Pojawia się więc potrzeba ich racjonalnego rozstrzygnięcia.

Do rozwiązania sformułowanego powyżej problemu zastosowano metodę systematycznego przeszukiwania. Zagadnienia dolnego poziomu były rozwiązane w sensie pareto, a konflikty pomiędzy zadaniami również rozwiązano w sensie pareto.

Obszar dopuszczalny Φ^{*}, wraz z przyjętym systemem kodowania punktów przedstawiono na rys. 5.

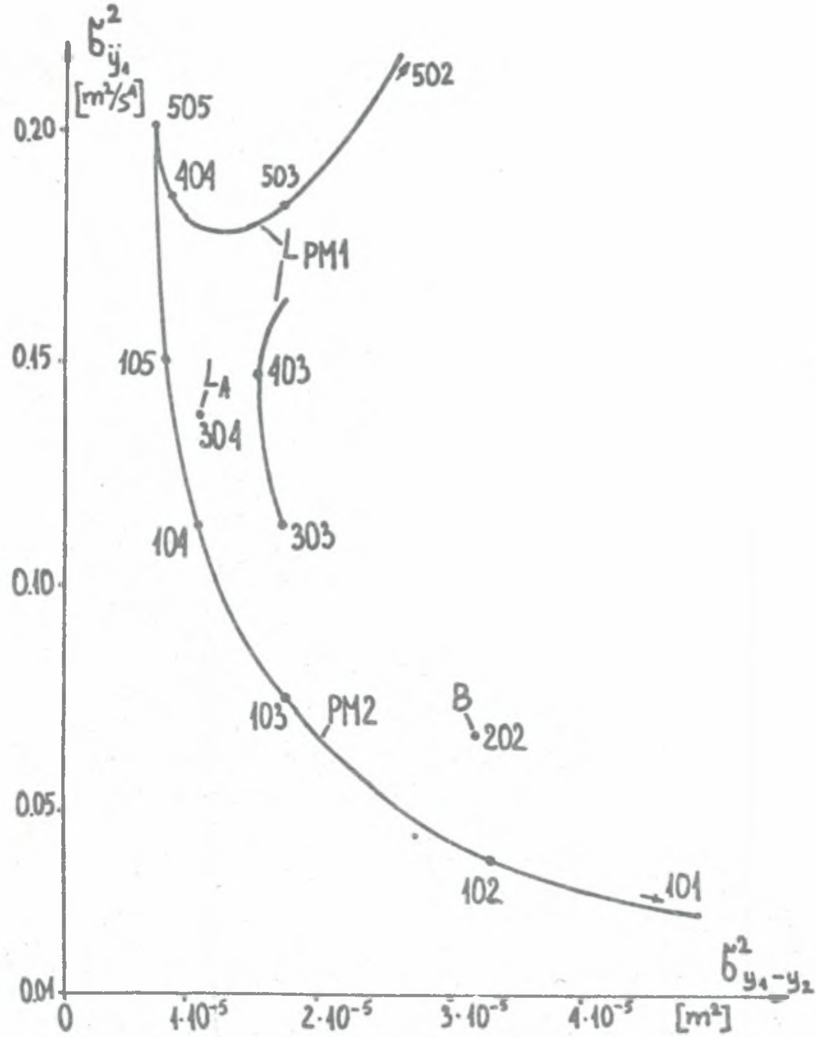


Rys. 5. Obszar dopuszczalny

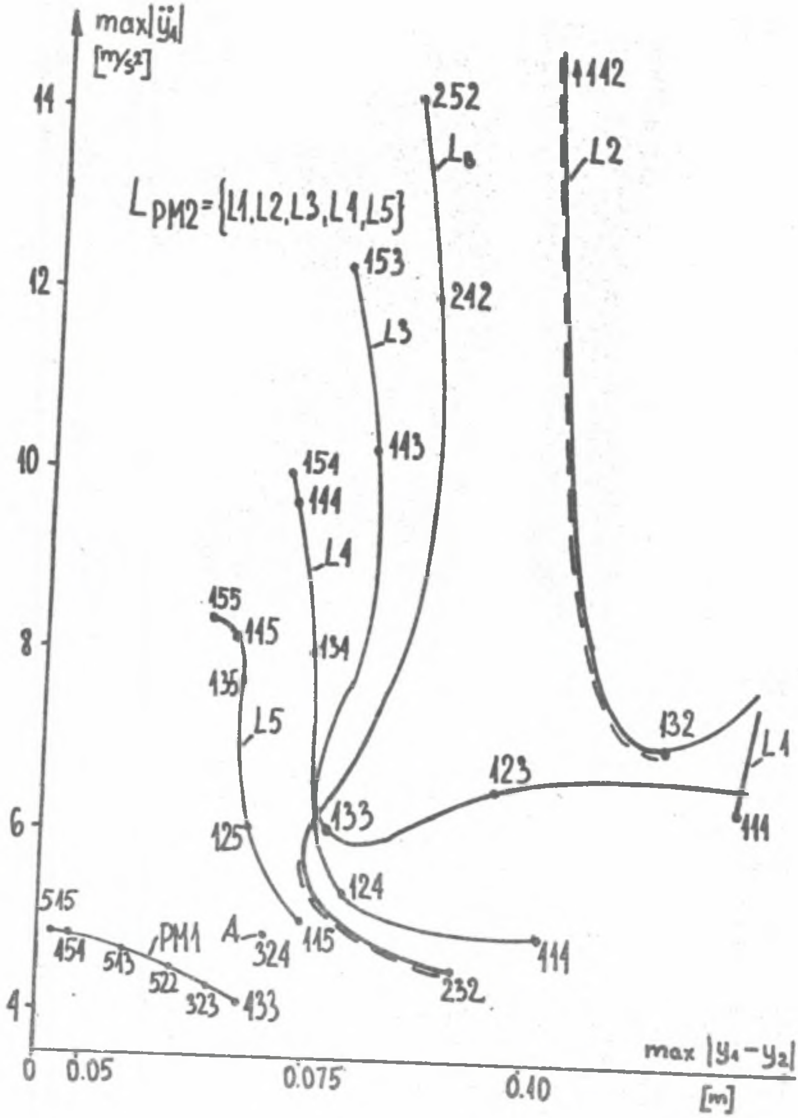
Zgodnie z propozycjami przedstawionymi w [11]w pierwszym kroku rozwiązano oba zadania niezależnie od siebie w sensie paretowskim. Wyniki przedstawiono na rys. 6 i 7/.

Przez PM2 oznaczono zbiór rozwiązań paretowskich w zadaniu pierwszym przy jego rozdzielnym rozwiązywaniu. Przez PM1 oznaczono analogiczny zbiór w zadaniu drugim.

Następnie dla wybranych punktów, należących do zbiorów PM1, PM2 /punkty wynikające z dyskretyzacji przy metodzie systematycznego przeszukiwania/, wyznaczono odpowiadające im zbiory rozwiązań w drugim zadaniu. Punkty należące do PM1 515,454 ,513, 522, 323, 433 odpowiadają na rys. 6 punktom 505, 404, 503, 502, 303, 403 i na odwrót punkty należące do PM2 101, 102, 103, 104, 105 odpowiadają na rys. 7 zbiorom L1, L2, L3, L4, L5. Zatem wychodząc z zadania pierwszego /jazda po drodze asfaltowej/, decydując się na któreś z rozwiązań w sensie pareto przynależne do PM2, np. punkt 102 odpowiada mu wówczas w zadaniu drugim zbiór L2, w zbiorze L2 również można wyodrębnić rozwiązania paretowskie /na rysunku oznaczono ten zbiór rozwiązań dodatkową linią przerywaną/. Podobnie można postąpić, zaczynając rozwiązywać problem od drugiego zadania,np.: wybierając punkt 522 należący do PM1 uzyskuje się punkt 502 w zadaniu drugim. W obu przypadkach jednak nie udaje się osiągnąć zbiorów polioptymalnych w sensie pareto w obu zadaniach jednocześnie. Świadczy to o konfliktowości problemu nie tylko na poziomie zadań, ale i na poziomie relacji międzyzadaniowych. Chcąc racjonalnie rozwiązać problem należy wypracować pewien kompromis pomiędzy nakreślonymi powyżej, przykładowo, skrajnościami. Np. załóżmy, że w zadaniu pierwszym wybrano punkt 202 oznaczony przez B, punktowi temu w zadaniu drugim odpowiada zbiór L_B, w którym z kolei wyodrębniono zbiór rozwią-



Rys. 6. Wyniki zadania polioptymalizacji przy jeździe po drodze asfaltowej



Rys. 7. Wyniki zadania polioptymalizacji przy przejeździe przez pojedynczą przeszkodę

zań polioptymalnych w sencie pareto /oznaczony dodatkową linią przerywaną/. Analogicznie można wyodrębnić punkty kompromisowe międzyzadaniowo wychodząc z zadania drugiego, np.: punkt 324 i L_A = 304. Postępując tak jak powyżej można znaleźć - wyselekcjonować najlepsze globalnie rozwiązanie, polioptymalne w sensie pareto, zgodnie z preferencjami decydenta.

Do rozwiązania problemu zastosowano metodę systematycznego przeszukiwania. W przypadku większych zadań należałoby się skłonić ku zastosowaniu metod prognozowania nieliniowego, powiązanych z metodami dekompozycji [11].

4. Wnioski

W pracy przedstawiono specyfikę problemów decyzyjnych w dynamice maszyn. Bardzo istotną rolę w tego typu zagadnieniach odgrywa postać równań ruchu, umożliwiająca lub nie zastosowanie określonych technik obliczeniowych. Należy zwrócić uwagę na konieczność całościowego podchodzenia do problemów dynamiki maszyn, zwłaszcza w przypadku prób optymalizacyjnych. Optymalizacja fragmentaryczna nie zawsze musi prowadzić do dobrych efektów; stąd też proponuje się etapizację rozwiązywania problemów. Omówiono własności różnych rozwiązań w warunkach losowości, przy czym wskazano na możliwość tworzenia nowych podejść mieszanych. Zaproponowana metodyka może zostać wykorzystana do rozwiązania szerokiej klasy dekomponowalnych problemów dynamiki maszyn.

Literatura

/1/ Hwang Ch.L., Masud A.S.: Multiple objective decision making Methods and application. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1979.

/2/ Hwang Ch.L Yoon K.: Multiattribute decision making. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1981.

/3/ Kamiński E.: Dynamika pojazdów i teoria zawieszeń.WPW, Warszawa, 1977.

/4/ Kamiński E.,Pokorski J.: Dynamiki zawieszeń i układów napędowych pojazdów samochodowych. WKiŁ, Warszawa 1983.

/5/ Keeney R.L.,Raiffe H.: Decisions with multiple objectives. Preferences and value trade-offs. Wiley, New York, Santa Barbara, London, Sydney, Toronto, 1976.

/6/ Osiński Z., Pokojski J.,Wróbel J.: Kryteria jakości i polioptymalizacja w warunkach losowości. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Automatyka z. 67, 1983.

/7/ Osiński Z.,Wróbel J.:Teoria konstrukcji maszyn.PWN,Warszawa, 1982.

[8] Pokojski J.: Polioptymalizacja liniowego układu drgającego o dwóch stopniach swobody przy wymuszeniu stochastycznym. III Konferencja "Metody i środki projektowania automatycznego", Warszawa 1981.

[9] Pokojski J.: Polioptymalizacja liniowego układu drgającego o dwóch stopniach swobody przy wymuszeniu stochastycznym. Sprawozdanie z resortowego problemu "Metody i środki projektowania automatycznego", nr 1.11.04. IPBM Politechniki Warszawskiej, Warszawa . 1982.

[10] Pokojski J., Wróbel J.: Porównanie wybranych metod polioptymalizacji przy badaniu pewnego modelu zawieszenia pojazdu. Sympozjon "Modelowanie w mechanice", Wisła 1982.

[11] Pokojski J.: Polioptymalizacja dużych zadań projektowych w budowie maszyn na przykładzie samochodowej skrzynki przekładniowej. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 1982.

[12] Osiński Z., Pokojski J., Wróbel J.: Polioptymalizacja pewnych dekomponowalnych zadań w dynamice maszyn. Sympozjon "Modelowanie w mechanice" Wisła, 1984.

[13] Von Fandel G., Wilhelm J.: Zur entscheindung Theorie bei mehrfacher Zielsetzung. Zeitschrift für Operations Research. Band 20. 1976.

COMPUTER AIDED DECISION MAKING IN MACHINE DYNAMICS

S u m m a r y

The methodic of solving the decision problems in the machine dynamics under certainty and under uncertainty is presented. As on exemple problem of polioptimal selection car suspension parameters is solved.

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В ДИНАМИКЕ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕВМ

Р е з ю м е

В работе представлено методику решения проблем принятия решений в условиях определенности и неопределенности.

В качестве примера представлено полиоптимальное определение характеристик в подвеске автомобиля.