3341/84

ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

WOJCIECH TARNOWSKI

MODEL PROCESU WYBORU W PROJEKTOWANIU TECHNICZNYM

AUTOMATYKA

Z. 72
GLIWICE
1984

Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej w Gliwicach
3341/84

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 787

WOJCIECH TARNOWSKI

MODEL PROCESU WYBORU W PROJEKTOWANIU TECHNICZNYM

GLIWICE 1984

OPINIODAWCY:

Prof. dr hab. Zbigniew Osiński
Doc. dr hab. inż. Wojciech Gasparski

KOLEGIUM REDAKCYJNE

Wiesław Gabzdyl (redaktor naczelny), *Anna Skrzywan-Kosek* (redaktor działu),
Elżbieta Stinzing (sekretarz redakcji)

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Kazimiera Rymarz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0434-0760

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 180+85 Ark. wyd. 9,67 Ark. druk. 9,625 Papier offset. kl. III. 70x100, 70 g
Oddano do druku 27.01.84 Podpis.do druku 2.04.84 Druk ukończ. w maju 1984
Zam 176/84 Z-24 Cena zł 97,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

Str.

WSTĘP 7

OBJAŚNIENIA UŻYWANYCH TERMINÓW 9

WYKAZ OZNACZEŃ 14

1. WPROWADZENIE 19
1.1. Sformułowanie celu pracy 19
1.2. Stan literatury i praktyki w zakresie wyboru w projektowaniu technicznym 20
1.3. Geneza pracy 22
1.4. Charakterystyka pracy 23
1.5. Uwagi metodologiczne 25

2. PROCES PROJEKTOWANIA 27
2.1. Projektowanie jako proces 27
2.2. Wymagania stawiane przedmiotom, podmiotom i procesowi projektowania technicznego 30
2.3. Klasyfikacja zadań projektowych 31
2.4. Struktura procesu projektowania 33
2.4.1. Makrostruktura procesu projektowania 37
2.4.2. Mikrostruktura procesu projektowania 37
2.4.3. Dekompozycja zadania projektowego 39
2.4.4. Podsumowanie 39

3. WYBÓR W PROCESIE PROJEKTOWANIA 43
3.1. Wstęp 43
3.2. Wybór a wieloetapowość i hierarchiczność procesu projektowania 44
3.2.1. Optymalizacja a etapowość procesu projektowania ... 45
3.2.2. Optymalizacja a dekompozycja zadania 46
3.3. Zmienne opisujące zadanie wyboru 47
Cechy konstrukcyjne 47
Zmienne decyzyjne 48
Właściwości konstrukcyjne 48
Kryteria oceny 49
3.4. Sformułowanie zadania wyboru 50
3.4.1. Zbiór wariantów projektowych A 51

Str.

3.4.2. Wymagania projektowe Ω 52
3.4.3. Zadanie satysfakcji 56
3.4.4. Wymagania i ograniczenia dotyczące procesu wyboru .. 57
3.5. Przegląd spotykanych ujęć zadania wyboru 58
3.6. Struktura jednoetapowego procesu wyboru 60
3.7. Systematyka procesów wyboru 69
3.7.1. Rodzaje zadań wyboru 69
3.7.2. Rodzaje sytuacji 70

4. MATEMATYCZNY MODEL ZBIORU WARIANTÓW 73
4.1. Wstęp 73
Rodzaje oceny 74
4.2. Kryteria oceny 76
4.3. Ocena rozmyta 79
4.4. Ocena probabilistyczna 83
4.4.1. Ocena jednoetapowa 83
4.4.2. Ocena sekwencyjna (wieloetapowa) 87

5. SYSTEM WARTOŚCI 92
5.1. System wartości i stawiane mu wymagania 92
5.2. Układ kryteriów 95
5.3. Pierwotne kryterium optymalizacji Φ_p 98
5.4. Nadrzędne kryterium optymalizacji Φ 101
5.5. Zadaniowe kryterium optymalizacji F 102
5.5.1. Cel, założenia 102
5.5.2. Wybór postaci kryterium zadaniowego F 104
5.5.3. Funkcja preferencji $u(k_i)$ 108
5.5.4. Przypadek deterministycznego określania funkcji preferencji 108
5.5.5. Przypadek losowego określania funkcji preferencji przy ciągłych współrzędnych przestrzeni stanu 109
5.5.6. Przypadek losowego określania funkcji preferencji przy dyskretnych współrzędnych przestrzeni stanu ... 110
5.5.7. Określanie współczynników wagi w_i 113
5.5.8. Podsumowanie paragrafu 5.5 114

6. UWAGI O OPTYMALIZACJI W PROJEKTOWANIU TECHNICZNYM 116
6.1. Polioptymalizacja 116
6.2. Optymalizacje 122
6.2.1. Optymalizacja "ciągła" 122
6.2.2. Optymalizacja na zbiorze skończonym, niezbyt licznym 123
6.2.3. Optymalizacja na licznym zbiorze skończonym 123
6.2.4. Optymalizacja, gdy część informacji ma charakter rozmyty 124
6.2.5. Optymalizacja bez skalarnego kryterium optymalizacji 128

Str.

6.2.6. Optymalizacja postaci i wymiarów konstrukcji jednocześnie 129
6.3. Decyzja 130

7. ZAKOŃCZENIE 132
7.1. Praktyczne wykorzystania proponowanej metodyki 132
7.2. Główne właściwości proponowanego modelu 137
7.3. Główne elementy dorobku pracy 139
7.4. Zakres przyszłych prac 140

LITERATURA 143

STRESZCZENIA 148

WSTĘP

Niniejsza praca dotyczy procesu projektowania technicznego, w którym obiektem projektowania może być urządzenie techniczne (np. maszyna, pomieszczenie, przyrząd pomiarowy itp.), proces techniczny (np. proces przetwarzania, proces montażu, proces transportowy itp.) lub złożony układ, zwany często systemem materialnym, obejmujący procesy i urządzenie realizujące te procesy.

Celem pracy jest zaproponowanie ogólnego modelu procesu wyboru w projektowaniu technicznym. W dostępnej literaturze brak uogólnień metodologicznych dotyczących procesu wyboru w projektowaniu - brak teorii, brak metodyki (patrz p. 1.2). Tymczasem sytuacje praktyczne, np. współpraca między projektantem a decydentem, planowanie i kontrola projektowania, optymalizacja, komputerowe wspomaganie projektowania i inne domagają się uporządkowania tego problemu i sformułowania pewnych uogólnień metodologicznych.

Przedstawiony w tej pracy model procesu wyboru może być wykorzystany do formalizacji i algorytmizacji tego procesu. Adekwatny jest dla przypadków, gdy dana jest informacja początkowa (choćby w formie opisowej) w postaci trójki $<A, \Omega, \phi>$, gdzie A jest zbiorem wariantów, Ω zbiorem wymagań a ϕ - nadrzędnym kryterium optymalizacji.

Tematycznie praca należy do metodologii projektowania technicznego (nauki konstrukcji). W niektórych szkołach wyższych metodologia jest już wykładana pod nazwą podstawy projektowania, doczekała się też opracowań monograficznych. Niniejsza praca ma też związek z dziedziną zwaną badaniami operacyjnymi.

Niniejsze opracowanie jest podsumowaniem dotychczasowych prac autora, zmierzających do opracowania metodyki wyboru w projektowaniu technicznym. Większość elementów tej pracy została już wcześniej opublikowana w latach 1976-1983, w szczególności treść rozdziałów 2.4, 5 i 6.1. Materiał tu zawarty był też i jest przedstawiany w ramach wykładów z metodologii projektowania studentom Wydziału Automatyki i Informatyki i Wydziału Architektury Politechniki Śląskiej oraz studentom Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej, a także słuchaczom studiów podyplomowych w Ośrodku Postępu Technicznego w Katowicach i uczestnikom Szkół Metodologii Konstruowania Maszyn, organizowanych przez Politechnikę Wrocławską.

Autor wyraża najgłębsze podziękowania za uwagi krytyczne wszystkim tym, którzy zadali sobie trud przejrzenia tekstu przed opublikowaniem, szczególnie Prof. Prof. S. Ziembie, R. Staniszewskiemu i A. Sielickiemu, a przede wszystkim Panom Recenzentom w osobach Prof. dra hab. inż. Z. Osińskiego i Doc. dra hab. inż. W. Gasparskiego, których sugestie przyczyniły się do podniesienia poziomu pracy.

OBJAŚNIENIA UŻYWANYCH TERMINÓW

Hasła podane są w alfabetycznej kolejności. W nawiasach podano [numer rozdziału] lub (numer wzoru). Nie było zamierzeniem autora definiowanie podanych pojęć.

Cechy konstrukcyjne [3.3] - zbiór wielkości, których wartości stanowią konieczny i wystarczający zbiór informacji potrzebny do wykonania i uruchomienia obiektu oraz do prowadzenia remontów.

Decydent - osoba lub organizacja podejmująca decyzję, mająca prawo podejmowania decyzji w sprawie wyboru (np. zatwierdzanie końcowego rezultatu wyboru, polecenie przerwania dalszych działań w procesie wyboru, zmiana zadania wyboru itp.) zgodnie z pragmatyką służbową.

Decyzja [6.3] - jednorazowy akt postanowienia w sprawie rezultatów wyboru, nie podlegający algorytmizacji, zawsze dokonywany przez człowieka, subiektywny, intuicyjny, arbitralny. Decyzje mogą być tylko takie: TAK, NIE, STOP.

TAK - oznacza: "Zatwierdzam rezultaty wyboru, przejdź do dalszych prac projektowych lub następnego etapu", NIE - "Nie zatwierdzam", z ewentualnym podaniem przyczyn i sugestiami zmian czy poprawek do procesu wyboru, STOP - oznacza, że kontynuację dalszych działań w danym procesie rozwiązywania zadania Z decydent uznaje za nieuzasadnioną i poleca wrócić do nadzadania Z_o.

Funkcja preferencji $u_i = u_i(k_i, S)$ [5.5.2] [5.5.3] - miara stopnia spełnienie nadrzędnego kryterium optymalizacji ϕ ze względu na określone kryterium oceny K_i. Wartość funkcji preferencji zależy od wartości danego kryterium oceny k_i oraz od stanu otoczenia S.

W pewnych przypadkach funkcja preferencji u może być interpretowana jako miara atrakcyjności poszczególnych wartości kryterium oceny dla eksperta.

Funkcja preferencji jest uogólnieniem pojęcia funkcji użyteczności, znanego w psychologicznej teorii decyzji [3.6], nie spełniającego koniecznego warunku monotoniczności w przedziale $[a_i, b_i]$.

Konstrukcja [3.4.1] wzór (3.6) - informacja, dostateczna do fizycznego wytworzenia obiektu.

Ma postać zbioru wartości cech konstrukcyjnych. Jest pojęciem abstrakcyjnym.

Konstruktor - patrz: Projektant.

Kryteria oceny K [3.3] [4.2] - zbiór zdefiniowanych wielkości tworzących system wartości W w danym zadaniu wyboru. Są argumentami nadrzędnego kryterium optymalizacji Φ.

Metodyka - zbiór metod właściwych danemu procesowi (np. metodyka wyboru) oraz zbiór reguł wyboru metod (strategia).

Model matematyczny zbioru wariantów [4.1] - zbiór formalnych związków między wartościami zmiennych decyzyjnych $x_p : p = \overline{1,P}$ i wartościami właściwości konstrukcyjnych $y_r : r = \overline{1,R}$.

Model procesu - układ abstrakcyjny, na który składają się: 1) struktura procesu, 2) zbiory procedur dla poszczególnych działań, 3) strategia procesu (reguły doboru kolejnych procedur).

Nadrzędne kryterium optymalizacji Φ [5.2] [5.4] - wielkość (niekoniecznie zdefiniowana) lub zbiór wielkości i relacji ważności, wynikających z pierwotnego kryterium optymalizacji Φ_p, ważnych dla wszystkich zadań wyboru danego procesu projektowania danego zadania projektowego Z.

Obiekt projektowany (przedmiot projektowania) - urządzenie techniczne (np. maszyna, budynek), proces (np. proces technologiczny, proces transportowy) lub złożony układ materialny (zwany często systemem materialnym), utworzony z wielu urządzeń i pomieszczeń, realizujących pewne procesy techniczne.

Obszar sprawności D [3.6] - zbiór wariantów poprawnych d_p lit. [59].

Ocena [4] -

1. Proces estymacji (ocenianie), którego zadaniem jest oszacowania wartości lub rozkładów wartości danego kryterium oceny K_i dla określonego wariantu a_v.
2. Rezultat procesu oceniania: wypowiedź zawierająca terminy wartościujące, czyli oznaczające jakąś wartość, w szczególności wartość danego kryterium oceny K_i dla określonego wariantu $a_v : k_{iv}$. Szczególną postacią oceny są zależności:

$$k_i = f_i(x_1, \ldots, x_p), \qquad i = \overline{1,I},$$

gdzie x_p są zmiennymi decyzyjnymi.

Optymalizacja [3.6] [6.2] - proces rozwiązywania zadania optymalizacji (wzór (3.21)), gdy dane są <F, A, S>, <F, D> lub <F, P> lub zadania satysfakcji, gdy ponadto dane jest F_{min} lub $\{k_{i\,min} : i = \overline{1,I}\}$.

Pierwotne kryterium optymalizacji Φ_p [5.2] [5.3] - wielkość lub zbiór wielkości (niekoniecznie zdefiniowanych) i relacji ważności, wynikających z systemu wartości W dla nadsystemu, którego częścią jest projektowany obiekt.

Podmiot projektowania - patrz: Projektant.

Polioptymalizacja [6.1] - proces rozwiązywania zadania polioptymalizacji.

Proces projektowania technicznego [2.1] - system działań, zmierzających do możliwie jednoznacznego określenia konstrukcji projektowanego obiektu na podstawie zidentyfikowanego problemu projektowego.
Jest elementem procesu zaspokajania potrzeb.
Definicje projektowania - patrz Jones [28, s. 20].

Proces wyboru - system działań zmierzających do rozwiązania zadania wyboru czyli całokształt działań przygotowujących decyzję.

Projektant (system projektujący, podmiot projektowania, konstruktor) - osoba lub organizacja realizująca proces projektowenia lub tylko proces wyboru wraz z jej wyposażeniem.

Przedmiot projektowania - patrz: Obiekt projektowany.

Przestrzeń stanów otoczenia S [5.5.5] - przestrzeń kartezjańska utworzona ze zmiennych stanu $s_g : g = \overline{1,G}$, będących argumentami funkcji preferencji. Zmienne określają stan otoczenia S^t, który interpretujemy jako warunki, w których projektowany obiekt będzie wytwarzany i eksploatowany.

Selekcja [3.6] - działanie, którego celem jest określenie zbioru wariantów dopuszczalnych (poprawnych) D.

Stan otoczenia S^t - patrz: "Przestrzeń stanów otoczenia".

Struktura procesu [2.4] - porządek działań (czynności), wyróżnionych ze względu na określone kryterium.

System projektujący - patrz "Projektant".

System wartości W [5.1] - układ atrybutów jakości obiektu (żądań, życzeń itp.) H i relacji B między nimi, przyjęto w danym zadaniu projektowym Z:

$$W = <H, B>.$$

Wariant (wariant projektowy, rozwiązanie) $a \in A$ [3.4.1] - wersja rozwiązania zadania projektowego, określona z dokładnością do zmiennych decyzyjnych.

Wariant dopuszczalny (poprawny) $d \in D$, $D \subset A$ [3.6], wzory (3.28), (3.29), (3.31), (3.33) - wariant, który nie zawiera błędów logicznych i czyni zadość wszystkim wymaganiom projektowym Ω (lub S).

Wariant optymalny $d_0 \in D$ [6.2], wzór (3.21) - wariant dopuszczalny, najlepszy ze względu na zadaniowe kryterium optymalizacji F.

Wariant polioptymalny (efektywny, Pareto - optymalny, kompromisowy, sprawny, niezdominowany) d_p [6.1], wzór (6.2) - wariant, dla którego nie można znaleźć innego, lepszego ze względu na wszystkie kryteria oceny jednocześnie.

Wariant poprawny - patrz: Wariant dopuszczalny.

Wariant satysfakcjonujący $d_s \in D$ [3.4.3], wzór (3.19) i (3.20) - wariant dopuszczalny, "wystarczająco dobry" ze względu na nadrzędne kryterium optymalizacji ϕ .

Właściwości konstrukcyjne Y (osiągi obiektu) [3.3] - zbiór wielkości $Y_r : r = \overline{1,R}$, których wartości y_r jednoznacznie określają właściwości eksploatacyjne obiektu, umożliwiając racjonalne użytkowanie, przechowywanie, transport i sprawdzanie tego obiektu.

Wybór - układ abstrakcyjny, złożony z zadania wyboru, procesu wyboru i podmiotu tego procesu (projektanta i decydenta) oraz opisu sytuacji, w której ma być realizowane zadanie wyboru [3.7.2].

Wymagania projektowe (konstrukcyjne) Ω lub S [3.4.2] - (w tym ograniczenia) - zbiór ograniczeń narzuconych na wartości cech konstrukcyjnych, właściwości konstrukcyjnych lub zmiennych decyzyjnych. Wymagania w postaci początkowej (opisowej) oznaczamy symbolem Ω , w postaci formalnej (równań i nierówności) - symbolem S.

Zadanie optymalizacji [6.2] - zadanie wyboru, którego rozwiązaniem jest wariant optymalny d_o.

Zadanie polioptymalizacji [6.1] - zadanie, którego rozwiązaniem jest zbiór wariantów efektywnych (zbiór Pareto) P, gdy dany jest zbiór rozwiązań A lub D oraz zbiór kryteriów oceny K.

Zadanie satysfakcji [3.4.3] - zadanie wyboru, którego rozwiązaniem jest zbiór (najczęściej jednoelementowy) wariantów satysfakcjonujących d_s.

Zadanie projektowe Z - problem zdefiniowany za pomocą czwórki $<WE, WY, \Omega, \phi>$ lub $<WE, WY, \Omega, W>$, gdzie WE i WY oznacza wejścia i wyjścia obiektu (w sensie systemowym). Zadanie Z może dotyczyć całego procesu projektowania lub jego części (po dekompozycji - patrz p.2.4.3).

Zadanie wyboru [3.4] - zadanie jednoznacznie sformułowane za pomocą trójki $<A, \Omega, \phi>$. Zadanie to może być zadaniem optymalizacji lub zadaniem satysfakcji.

Zadaniowe kryterium optymalizacji F [5.2], [5.5] - zdefiniowana, mierzalna, skalarna miara jakości wariantów $a \in A$, wynikająca z przyjętego nadrzędnego kryterium optymalizacji ϕ oraz z pierwotnego kryterium optymalizacji ϕ_p, ważna w danym zadaniu wyboru i możliwa do wyznaczenia ilościowego w danym zadaniu wyboru.

Zakłócenie [4.4.1] (wielkości zakłócające) - zbiór wielkości $Z = \{z_m : m = \overline{1,M}\}$ wpływających na kryteria oceny K_i, $i = \overline{1,I}$, nie będących cechami konstrukcyjnymi x_p

$$k_i = f_i(x_1,\ldots,x_p, z_1,\ldots,z_M).$$

Zakłócenia tworzą M-wymiarową przestrzeń zakłóceń Z.

Zbiór Pareto P [3.6] [6.1] (zbiór rozwiązań efektywnych, sprawnych) - zbiór wariantów polioptymalnych.

Zmienne decyzyjne X [3.3] - minimalny zbiór wielkości $X = \{x_p : p = \overline{1,P}\}$ (np. cech konstrukcyjnych), których wartości jednoznacznie definiują wariant a w zbiorze wariantów $A : a_v = [x_{1v},\ldots,x_{Pv}]$.

Zmienne stanu $s_g : g = \overline{1,G}$ - patrz: "Przestrzeń stanów otoczenia".

WYKAZ OZNACZEŃ

(w nawiasach podano rozdział lub wzór, w którym dane pojęcie jest zdefiniowane i omówione)

a_i - dopuszczalna, najmniej korzystna wartość kryterium oceny K_i

b_i - dopuszczalna, najbardziej korzystna wartość kryterium oceny K_i

$a \in A$ - wariant (wersja) rozwiązania zadania projektowego Z

$d \in D \subset A$ - wariant dopuszczalny (3.6)

$d_p \in P \subset D \subset A$ - wariant sprawny (polioptymalny, efektywny, kompromisowy, niezdominowany) (6.1)

d_s - wariant satysfakcjonujący (3.4)

d_o - wariant optymalny (3.4)

e_i - "progowa" wartość kryterium oceny K_i (5.5.2, wzór 5.10)

f - ogólny symbol funkcji

$f(k_{iv}) \equiv f_{iv}$ - gęstość prawdopodobieństwa zmiennej losowej K_i dla v-tego wariantu, ocena probabilistyczna k_{iv} (4.4)

$k_i = [k_{i\,min}, k_{i\,max}] = [a_i, b_i]$ - zbiór wartości i-tego kryterium oceny K_i

$k_i^* = \frac{k_i - a_i}{b_i - a_i} = [0, 1]$ - zbiór znormalizowanych wartości i-tego kryterium oceny K_i (5.5.2, wzór 5.9)

$p(S^t) \equiv p^t$ - prawdopodobieństwo wystąpienia stanu S^t

$p = [1, P]$ - numeracja zmiennych decyzyjnych X (3.3)

$r = [1, R]$ - numeracja właściwości Y (3.3)

$\{s_j : j = \overline{1,n}\}$ - zbiór stanów natury (3.3, rys. 4.9)

$\{s_g : g = \overline{1,G}\}$ - zbiór współrzędnych stanu (5.5.5)

$\underline{s}_g$, $\overline{s}_g$ - minimalna i maksymalna wartość zmiennej e_g (5.5.5)

$\{s_g^l : l_g = \overline{1,L_g}\}$ - skończony zbiór wartości zmiennej stanu s_g (5.5.6)

$u(k_i) \equiv u_i$ - funkcja preferencji (funkcja użyteczności) kryterium oceny $K_i : u_i : [a_i, b_i] \to [0, 1]$ (5.5.3, 5.5.2)

u_{io}^t - wartość funkcji preferencji dla i-tego kryterium oceny, dla wartości $k_i = k_{io}$, dla t-tego etanu S^t

$v = [1, V]$ - numeracja wariantów dopuszczalnych (poprawnych)

w_i - współczynnik wagi kryterium oceny K_i (5.5.2, 5.5.7)

$x_p = [x_{p\,min}, x_{p\,max}]$ - zbiór wartości zmiennej X_p

$y_r = [y_{r\,min}, y_{r\,max}]$ - zbiór wartości zmiennej Y_r

$\{z_m : m = \overline{1,M}\}$ - zbiór zakłóceń; z_m - zmienna, współrzędna przestrzeni zakłóceń Z [4.4]

$\{z_m^j : j = \overline{1,J_M}\}$ - skończony zbiór wyróżnionych stanów zmiennej z_m [4.4]

A - zbiór wariantów (wersji rozwiązań) projektowych [3.4]

$A = \{a_v : v = \overline{1,V_o}\}$ - dany, skończony zbiór wariantów [3.6]

$B = [b_{ij}]$ - macierz I*I - wymiarowa relacji między kryteriami oceny K_i lub między cechami jakości H_i [5.1]

$D = \{d\}$ - zbiór wariantów poprawnych (obszar sprawności) [3.6]

$D = \{d_v : v = \overline{1,V}\}$ - skończony zbiór wariantów poprawnych [3.6]

D^X - obszar sprawności w przestrzeni X

D^Y - obszar sprawności w przestrzeni Y

F - zadaniowe kryterium optymalizacji (funkcja celu), funkcjonał, $F \in [0,1]$ [5.2] [5.5]

F_{min} - satysfakcjonująca (minimalna dopuszczalna) wartość F

$H = \{H_i : i = \overline{1,I}\}$ - zbiór atrybutów jakości (aspektów, cech jakości) [5.1]

I - liczność zbioru kryteriów oceny K [3.3]

$K = \{K_i : i = \overline{1,I}\}$ - zbiór kryteriów oceny (zbiór nazw zmiennych K_i) [3.3] [3.6] [4.2]

M - liczność zbioru zakłóceń z_m

M - liczba faz makrostruktury [2.4]

N - liczność zbioru podzadań Z_n, na które zdekomponowano dane zadanie Z [3.2]

P - liczność zbioru zmiennych decyzyjnych X [3.3].

$P = \{d_p\}$ - zbiór wariantów polioptymalnych (efektywnych, kompromisowych, nieulepszalnych, niezdominowanych, zbiór Pareto) [6.1]

$P_i = \{P_{ij} : j = \overline{1,J_i}\}$ - zbiór dopuszczalnych ocen rozmytych [4.3] [6.2.4]

R - liczność zbioru właściwości Y wariantów A [3.3]

S - wymagania projektowe (konstrukcyjne): zbiór ograniczeń nałożonych na wartości zmiennych X_p, Y_r oraz na ich funkcje $f(x_1,\ldots,x_p,y_1,\ldots,y_R)$ [3.4]

$S = \{s_1,\ldots,s_g,\ldots,s_G\}$ - przestrzeń stenów otoczenia [5.5.5]

S^t stan otoczenia

$\{S^t : t = \overline{1,T}\}$ - skończony zbiór wyróżnionych stanów otoczenia [5.5.5]

$\{T_{iz} : z = \overline{1,Z_i}\}$ - repertuar rozkładów funkcji przynależności i-tego współczynnika wagi w_i [6.2.4]

V - liczność zbioru wariantów dopuszczalnych D [3.6]

$W = \langle K, B\rangle$ lub $\langle K, B, S\rangle$ lub $\langle \Phi, \Omega\rangle$ lub $\langle F, S\rangle$ - system wartości [5.1] [5.2]

$X = \{X_p : p = \overline{1,P}\}$ - zbiór zmiennych X_p; przestrzeń zmiennych decyzyjnych [3.3] [3.6]

$Y = \{Y_r : r = \overline{1,R}\}$ - zbiór zmiennych Y_r; przestrzeń właściwości konstrukcyjnych [3.3] [3,6]

$Z = \langle WE, WY, \Omega, W\rangle$ - zadanie projektowe [5.2]

$\{Z_n : n = \overline{1,N}\}$ - zbiór zadań częstkowych po dekompozycji zadania Z

$Z = \{z_1\} \times \ldots \times \{z_M\}$ - przestrzeń zakłóceń [4.4]

$\{z^t : t = \overline{1,T}\}$ - skończony zbiór stanów w przestrzeni zakłóceń Z [4.4]

$\{\alpha_i : i = \overline{1,I}\}$ - wektor wykładników potęgowych kryteriów oceny K (wzór (5.10), (5.14) i (5.17))

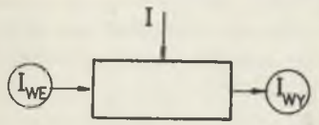
$\mu_i(k_i)$ - funkcja przynależności zmiennej K_i [4.3]

ϕ_p - pierwotne kryterium optymalizacji [5.2] [5.3]

ϕ - nadrzędne kryterium optymalizacji [5.2] [5.4]

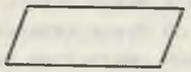
Ω - niesformalizowana postać wymagań projektowych [3.4]

Oznaczenia stosowane na schematach działań



działania lub kompleks działań, przetwarzający informację (wejściową) I_{we} w informację (wyjściową) I_{wy}, przy dodatkowej informacji I

stan procesu, np. otrzymana informacja I



formalny rezultat działań (z reguły w postaci dokumentu)

decyzja (niealgorytmiczna)

1. WPROWADZENIE

1.1. Sformułowanie celu pracy

Jednym z podstawowych rodzajów działań w procesie projektowania technicznego, powtarzanych wielokrotnie jako wybór, rozumiemy tu jako zbiór zabiegów zmierzających do wskazania jednego wariantu ze zbioru wcześniej określonych wariantów. Podstawą wyboru jest zawsze pewien system wartości, definiowany jako układ żądań, życzeń i relacji między nimi. Ze względu na to, że ten system określony jest wstępnie najczęściej dość subiektywnie, a wybór często nie jest w pełni formalny, konieczny jest na zakończenie akt decyzji, w którym decydent wybrany wariant zatwierdza lub nie. Decyzję przyjmujemy jako działanie w pełni subiektywne i arbitralne, i jako taką wyłączamy z procesu wyboru.

Przedmiotem wyboru i decyzji może być obiekt (przedmiot projektowania), projektant (podmiot projektowania) lub procedura projektowania, to znaczy celem wyboru może być wskazanie, co ma być dalej projektowane lub wykonane lub kto ma to robić lub jak należy to robić.

W każdym przypadku decydent żąda, aby wybrany wariant był najlepszy w sensie przyjętego systemu wartości i aby spełniał wszystkie wymagania. Zatem wybór jest nierozłącznie związany z optymalizacją. Zadanie optymalizacji formułowane jest zwykle następująco: należy znaleźć taki wektor x_o w przestrzeni $X = x_1 \times x_2 \times \ldots \times x_p \; : \; x_o = [x_{1o}, x_{2o}, \ldots, x_{Po}]$, aby jego współrzędne spełniały wszystkie wymagania równościowe: $f_s(x_{1o}, \ldots, x_{Po}) = 0 \; : \; s = \overline{1,S}$ i nierównościowe: $g_t(x_{1o}, \ldots, x_{Po}) \geqslant 0 \; : \; t = \overline{1,T}$ oraz aby wartość pewnego funkcjonału (funkcji celu) $F(x_o)$ była ekstremalna w określonym obszarze przestrzeni X. Takie sformułowanie nazywa się matematycznym modelem zadania optymalizacji.

W realnych warunkach projektowania technicznego doprowadzenie zadania wyboru do matematycznego modelu zadania optymalizacji jest bardzo trudne, znacznie trudniejsze niż sam proces optymalizacji. Typowe trudności są następujące:

1. Nigdy nie ma pełnej jasności co do funkcji celu, a dodatkową trudnością jest to, że zależy ona od niepewnych warunków, które wystąpią w przyszłości.

2. Wymagania są często niepewne lub niejasne i bywają formułowane opisowo.

3. Związki równościowe w obiekcie są często niepewne, oparte na przybliżonych zależnościach fizycznych czy ekonomicznych.

4. Matematyczny model zadania optymalizacji jest zawsze uproszczony (niektóre związki równościowe i nierównościowe są niepewne, niektórych brak), w związku z czym nie wiadomo dokładnie, jak otrzymane rozwiązanie jest odległe od rzeczywistego rozwiązania optymalnego.

5. Zbiór zmiennych $\{x_1,\ldots,x_p\}$ często jest także dyskusyjny.

Ze względu na niepewność sformułowania zadania wyboru wyniki są niepewne i powinny być subiektywnie ocenione przez decydenta (projektanta), jest więc konieczna arbitralna decyzja końcowa.

Zadaniem niniejszej pracy jest opis procesu wyboru na tle procesu projektowanie, pokazanie wszelkich uwarunkowań tego procesu, jego analiza, sformułowanie zadenia wyboru oraz synteza matematycznego modelu procesu wyboru, tzn. racjonalnej uporządkowanej metodyki przeprowadzania procesu wyboru, ważnej dla szerokiej klasy przypadków projektowenia technicznego.

1.2. Stan literatury i praktyki w zakresie wyboru w projektowaniu technicznym

Dotychczasowe próby całościowego uporządkowania problematyki wyboru w projektowaniu technicznym są bardzo nieliczne. Należy tu wymienić artykuł Bojarskiego [3], w którym autor wyraża pogląd, że wytwór powinien być optymalizowany ze względu na jedno kryterium kosztowe (np.sumaryczny uogólniony zysk społeczny netto), w związku z czym nie ma problemu optymalizacji wielokryterialnej. Opisuje też ogólną procedurę takiego postępowania. Dorosiński [13], [14] również proponuje ogólną procedurę optymalizacji wariantu projektowego na podstawie jednego skalarnego kryterium wyboru, nazwanego efektywnością działania, niezbyt jednoznacznie zdefiniowanego jako iloraz efektu do nakładu na działanie, za staszymi pracami Wasiutyńskiego. Propozycja ta ogranicza się jednak do skończonego zbioru wariantów i do obiektów, które należę do klasy obiektów mającej liczną reprezentację wcześniej produkowenych obiektów, np. samochody czy telewizory.Lenkiewicz i Machowski [39] w metodzie LEMACH przewidzieli dwie procedury: wyboru międzywariantowego i wyboru wewnątrzwariantowego, przy czym są one sformułowane bardzo lakonicznie i nie precyzują żadnego określonego kryterium wyboru. Bardziej szczegółowy jest algorytm Rohatyńskiego i współpracowników [54], w którym proponuje się stosowanie skalarnego kryterium optymalizacji, obliczanego jako ważona suma pewnych wskaźników jakości.

W literaturze można spotkać wiele innych przykładów prac dotyczących wyboru, oceny, optymalizacji czy decyzji w projektowaniu,o czym będzie mowa w rozdz. 5. Wyróżnić jednak należy prace monograficzne z zakresu metodologii projektowania i podstaw projektowania, tzn. podręczniki Bąbińskiego [2], Dietrycha [12], Osińskiego [50] i Sielickiego [59]. Zajmują się one metodami optymalizacji, dyskusją kryteriów oraz teorią decyzji w zastosowaniu do projektowania oraz metodami prognozowania. Należy też zwrócić uwagę na zbiór metod Golińskiego [23] oraz zbiór przykładów Pogorzelskiego [101]. Stan publikacji zagranicznych jest trudny do ocenienia ze względu na utrudniony dostęp do nich. Istnieje bardzo bogata literatura anglosaska z zakresu badań operacyjnych (np. [56], [58], [18], [45], [46]), natomiast znana autorowi literatura z zakresu metodologii projektowania, np. [26], [28] czy [90] nie przynosi operacyjnych wskazówek w zakresie wyboru. W literaturze radzieckiej można spotkać prace teoretyczne dotyczące teorii wyboru, np. artykuły Ajzermana w czasopiśmie "Avtomatika i Tielemiechanika" lub książka L.S. Gutkina "Optimizacja radioelektronnych ustrojstw" (wyd. Sovietskoje Radio, Moskva 1975) lub bardzo uproszczone procedury w podręcznikach konstruowania. W NRD opublikowano instrukcję projektowania o charakterze normy [25], zawierającą bardzo uproszczone algorytmy wyboru, oparte na ocenie punktowej.

Jeszcze bardziej skąpe są materiały opracowane przez praktykę.Mają one zwykle charakter instrukcji projektowania, np. "Instrukcja technicznego przygotowania i uruchomienia produkcji nowych wyrobów. Sprzęt elektroniczny", obowiązująca w zakładach UNITRA, czy "Instrukcja organizacji technicznego przygotowania produkcji nowych wyrobów w przedsiębiorstwach Zjednoczenia MERA", wyd. Warszawa, czerwiec 1971. Nie precyzują one jednak ani sposobu ani kryteriów optymalizacji, pozostawiając je arbitralnej decyzji projektanta. Uderzającym przykładem na to, jak niski jest poziom unormowania wyboru w projektowaniu nawet najkosztowniejszych obiektów,jest dwustronicowa instrukcja porównania ofertowego dla linii technologicznych, obowiązująca w Ministerstwie Hutnictwa od 1977 roku. Zawiera ona tabelę ofert, będącą tablicą ocen, bez najmniejszej próby ich syntezy.

Nietypowym wyjątkiem jest komputerowy "System oceny i wyboru alternatyw dla projektowanych wyrobów", Warszawa, czerwiec 1979, opracowany przez Instytut Organizacji Przemysłu Maszynowego, na zamówienie Departamentu Techniki MPM. Cel tego systemu autorzy definiują następująco: "Przygotowanie decydentowi odpowiedniego zestawu wariantów oceny celowości rozwoju konstrukcji nowych i zmodernizowanych wyrobów, przeznaczonych na eksport na drugi obszar płatniczy". Jest to ocena ekonomiczna i kryterium wyboru jest opłacalność.

W krajach kapitalistycznych istnieją szczegółowe instrukcje, przede wszystkie dla projektowania wstępnego. Kryterium jest zawsze zysk wytwórcy. Są to najczęściej instrukcje szczegółowo precyzujące, jaki materiał informacyjny należy zebrać, w jaki sposób, kto za co odpowiada itd. oraz precyzują algorytm określania wariantu optymalnego z punktu widzenia wytwórcy. Materiały te opracowywane są przez poszczególne firmy, nie są publikowane i niechętnie udostępniane osobom postronnym. Do działań wyboru przywiązuje się najwyższą wagę i nie szczędzi się środków na prawidłową realizację.

1.3. Geneza pracy

Wybór i decyzja mają kluczowe znaczenie dla rezultatów projektowania: są tak ważne, że niektórzy teoretycy projektowania (np. Asimow) uznają je za element definicyjny projektowania, zauważając, że projektowanie jest iterecyjnym działaniem decyzyjnym w warunkach niepewności. W miarę postępu procesu projektowania powstaje wiele sytuacji decyzyjnych; ich wykrycie i racjonalne rozwiązanie jest pierwszoplanowym zadaniem projektanta i organizatora procesu projektowania, stosownie do znaczenia, jakie te decyzje mają dla końcowych rezultatów procesu projektowania.

Obecna sytuacja w kraju w zakresie praktycznego projektowania nie wydaje się zadowalająca pod względem metod wyboru. W biurach projektowych formalny wybór prowadzony jest bardzo rzadko, regułę jest projektowanie "jednowariantowe", projektowany wariant wybierany jest często intuicyjnie,przy czym procedura wyboru nie ma dostatecznego uzasadnienia i udokumentowania. Czasami w końcowych etapach projektowania spotyka się optymalizację parametryczną, jeśli problem udaje się sformalizować, można zidentyfikować potrzebne dane i jeśli zleceniodawca jest zdecydowany ponieść dodatkowe koszty. Ale i w tych przypadkach wąsko rozumianej optymalizacji kryteria optymalizacji przyjmowane bywają arbitralnie, bez należytego uzasadnienia, co stawia pod znakiem zapytania celowość tych wysiłków.

Odmienna sytuacja jest w przodujących krajach przemysłowych.Wybór,szczególnie w początkowych fazach projektowania, jest najważniejszym zadaniem i poszczególne organizacje projektowe mają obszerne i szczegółowo opracowane procedury postępowania w tym zakresie. Podstawą wyboru są wskaźniki ekonomiczne, przy czym uwzględnia się też inne aspekty społeczne, np.ekologiczne, przez zastosowanie odpowiedniego systemu podatków, kar, ulg i kredytów, będącego instrumentem polityki państwa. Trudno jednak przytoczyć szczegółowe przykłady w tym zakresie, gdyż problemy procedur wyboru i kryteriów mają charakter poufny w poszczególnych przedsiębiorstwach.Odbiciem wysokiej rangi przykładanej do tych spraw na świecie jest szybki rozwój dziedziny wiedzy o nazwie "Technology Assessment", która ma swoje bogate piśmiennictwo i formy organizacyjne.

Znaczenie wyboru i decyzji w projektowaniu będzie stale rosło, dzięki wzrastającym wymaganiom stawianym przedmiotom projektowania i wynikającym stąd żądaniom wobec podmiotów projektowania i metod projektowania.Ważność wyboru jest szczególnie zauważana przez projektantów tzw. systemów wielkich i przez autorów prac z zakresu projektowania wspomaganego komputerowo. Ponadto, dzięki zastosowaniu konstrukcyjnych elementów typowych (np. w elektronice, budownictwie, przemyśle maszynowym i in.) udział działań związanych z wyborem w całokształcie działań projektowych rośnie, a ich obiektywizacja może być coraz lepsza przez powszechniejsze zastosowanie maszyn cyfrowych do projektowania.

Genezą pracy stało się spostrzeżenie, że istotną barierę w projektowaniu stał się proces wyboru. Jest on jednym z najmniej uporządkowanych i sformalizowanych działań w projektowaniu technicznym. Szczególnie jest to widoczne, gdy porównać ten stan z szybkim rozwojem teorii i metod wspomagających ten wybór, a szczególnie teorii i metod optymalizacji i polioptymalizacji, często bardzo wyrafinowanych,teorii niedeterministycznego opisu rzeczywistości (probabilistyki i teorii zbiorów rozmytych) oraz postęp w dziedzinie sprzętu i oprogramowania CAD (Computer Aided Design).

Z drugiej strony stale rośnie nacisk ze strony praktyki i dydaktyki na to, aby proces wyboru zracjonalizować i zalgorytmizować. Ma to poprawić jakość projektowania, umożliwić podejmowanie dobrych decyzji także przez niedoświadczonych projektantów, a także uwolnić decydentów od pomówień o tendencyjność i nieobiektywność decyzji.

1.4. Charakterystyka pracy

W niniejszej pracy przedstawiono uogólniony model procesu wyboru w projektowaniu technicznym. Proces wyboru został zdefiniowany jako ogół działań przygotowujących decyzję; formalna optymalizacja jest końcowym działaniem tego procesu. Przez model rozumie się tutaj:

- zbiór działań składowych procesu oraz ich opis,
- strukturę procesu (zbiór relacji między działaniami składowymi),
- zbiory metod wspomagających poszczególne działania,
- strategię procesu czyli zespół reguł określających kolejność wykonywania poszczególnych czynności w danym procesie oraz metody wyboru metod wspomagających poszczególne działanie, zależnie od rodzaju procesu.

Przedstawiony model opisuje właściwości niezmiennicze szerokiej klasy procesów wyboru w projektowaniu technicznym, dlatego jest on modelem uogólnionym.

Model procesu wyboru zaproponowano w ujęciu systemowym:

- pokazując proces wyboru jako element większego systemu działań zaspokajania potrzeb,
- traktując sam proces wyboru jako system działań, wyróżniając elementy tego systemu,
- wyróżniając przedmiot, podmiot i sam proces wyboru.

Proponowany model oparty jest na analizie celów projektowania (skąd wynikają stawiane mu wymagania) oraz dostosowany jest do różnych sytuacji decyzyjnych (patrz rozdz. 2.3 i 2.4). Dostosowany jest też do formy i treści informacji rzeczywiście dostępnej w projektowaniu. Nie jest również sprzeczny z poglądami zawartymi w literaturze, przy czym na ile to było możliwe ujmuje formalnie to, co było dotychczas intuicyjne.

Przedstawiony model spełnia, zdaniem autora, założenia i wymagania stawiane racjonalnemu procesowi wyboru w projektowaniu technicznym (patrz rozdz. 3.4).

Nie było zamierzeniem autora opracowanie propozycji teorii procesu wyboru. Jak się zdaje, przedstawiony materiał może być jednak uznany jako wstęp do takiej teorii, gdyż zawiera jej niezbędne elementy: zbiór pojęć (język teorii), zbiór twierdzeń oraz określenie zakresu ważności (zasięg teorii).

Proponowany w tej pracy model wystarcza do budowy procedur (w postaci instrukcji postępowania) wyboru, ważnych dla określonych klas zadań wyboru w projektowaniu technicznym. Może być jednak wykorzystany również w innych działaniach, np. w procesach zarządzania, organizacji, sterowania procesami i wszędzie tam, gdzie podejmuje się ważne decyzje w sposób racjonalny. Procedury takie mają charakter programów heurystycznych, a w niektórych fragmentach mogą być wspomagane komputerem.

Niniejsza praca pokazuje możliwość włączenia procesu wyboru (procesu poszukiwania rozwiązania optymalnego) do programów CAD (komputerowego wspomagania projektowania). Wskazuje też na celowość współdziałania projektanta z komputerem. Istnieją próby opracowania takich systemów konwersacyjnych, jednak w tych systemach algorytmizacja wyboru ogranicza się do procedury wyboru programu optymalizacji. Przyczyną jest raczej brak ogólnej koncepcji ujęcia całości problematyki wyboru niż same ograniczenia wynikające z możliwości programowo-sprzętowych komputera.

W danym procesie projektowania wybór robiony jest wielokrotnie. Przy zasadniczo niezmiennym kryterium nadrzędnym ϕ kryterium zadaniowe podlega ciągłym ulepszeniom, od fazy do fazy makrostruktury procesu projektowania. Kryterium zadaniowe należy starać się formułować nawet wówczas, gdy formalna optymalizacja nie będzie prowadzona w danym zadaniu. Jest ono wówczas pomocne do optymalizacji intuicyjnej.

Wybór jest jednym z typowych, wielokrotnie powtarzanych działań: jest to proces przetwarzania, zdobywania i generowania informacji. Jego ważność wynika stąd, że działania te wprost decydują o jakości projektowanego wytworu.

Istotną częścią pracy jest formalizacja systemu wartości (w szczególności dla przypadku, gdy wymagania i życzenia opisane są probabilistycznie lub częściowo w sposób rozmyty) oraz dynamika procesu przekształcania kryteriów i struktura procesu wyboru. Zbudowano dwie struktury: jedna (wg rys. 3.4) charakterystyczna jest dla wczesnych faz makrostruktury procesu projektowania, druga (wg rys. 3.3) - dla późniejszych, szczegółowych.

Jedną z tez pracy jest to że skalarna, wielokryterialna funkcja celu F ma znaczenie ogólne. W rzeczywistych przypadkach projektowania F często ma interpretację fizyczną, np. niezawodność, błąd układu, wydajność itp. W innych przypadkach niemal zawsze jest to jakaś forma kosztu. Często po intuicyjnym zestawieniu listy kryteriów oceny (które w proponowanym modelu są argumentami F) widać, że są one argumentami pewnej określonej wielkości fizycznej lub ekonomicznej (patrz rozdz. 5.5.8).

1.5. Uwagi metodologiczne

Niniejsza praca tematycznie należy do metodologii projektowania, rozumianej jako nauka o metodach projektowania. Stąd wynikają pewne konsekwencje co do metodologicznej strony tej pracy: sposobu formułowania przesłanek i stawiania hipotez, języka i ścisłości twierdzeń, a w szczególności sposobów dowodzenia i weryfikacji teorii.

Metodologia projektowania jest nauką praktyczną. Według Nowaka [92, s. 217] osobliwością nauk praktycznych jest to, że zajmują się nie wyjaśnianiem, lecz projektowaniem. W przypadku metodologii projektowania jest to projektowanie projektowania.

Zadaniem metodologii jest między innymi rekonstruowanie stosowanych metod lub proponowanie nowych oraz wykazanie ich racjonalności. Przez racjonalność (Szaniawski [93]) rozumie się tu skuteczność ze względu na cel: należy więc określić ten cel explicite i wykazać, że metoda gwarantuje lub przynajmniej czyni bardziej prawdopodobne uzyskanie żądanego wyniku. O działaniu racjonalnym mówimy wówczas, gdy zostały poddane analizie logicznej i ocenie wszystkie możliwe warianty działania i gdy został wybrany najlepszy z nich, bez względu na emocje, dogmaty czy przesądy [36, s.12], tzn. gdy spełniony jest "postulat konsekwencji oceny i maksymalizacji wyboru".

Celem metodologii projektowania jest teoria empiryczna [94, s.25], gdyż brak jej systemu uznanych aksjomatów [95, s.176], które mogłyby stać się podstawą teorii dedukcyjnej.

Wszystkie twierdzenia pracy opierają się na obserwacji procesu, a jednocześnie są zgodne z twierdzeniami prakseologii.

Ajdukiewicz [95, s.175] przypisuje metodologii znaczenie normatywne, przy czym normy poprawności procedury naukowej nie są przez metodologię narzucane lecz wykryte z praktyki. Stawia on pragmatycznej metodologii [95, s. 175] następujące cele:

1) wyróżnianie typów czynności oraz ich analiza doprowadzająca do ich definicji,

2) opis procedur naukowych i postulowanie nowych,

3) identyfikacja celów i kodyfikacja norm poprawnego (racjonalnego) postępowania ze względu na te cele.

Należy podkreślić, że celem metodologii projektowania, prócz zwiększenia efektywności działania systemów projektujących jest zwiększenie efektywności kształcenia w zakresie projektowania [96]. Wynika to ze zwiększających się ciągle wymagań stawianych projektowaniu [68]. Tutaj podkreślimy, że jest niewiele nauk, które mają tak silny związek z dydaktyką jak

metodologia projektowania i to rzutuje na jej metodę, a także na pragmatyczne podejście i sposoby prezentacji wyników.

Cele, o których była mowa powyżej osiąga się przez:

1) badanie rzeczywistych procesów projektowania, szczególnie tych,które prowadzone są przez utalentowanych projektantów,

2) wykorzystanie i łączenie w całość dorobku innych nauk,

3) badanie struktury procesu projektowania, identyfikację celów i warunków poszczególnych działań,

4) wykrywanie metod, obmyślanie nowych metod,

5) proponowanie racjonalnych kryteriów oceny poszczególnych elementów procesu projektowania.

Ponieważ metodologia projektowania nie jest nauką dedukcyjną, kluczowy staje się problem metod naukowych, właściwych metodologii projektowania, a w szczególności problem uzasadniania twierdzeń i dylemat dostateczności uzasadnień.

Metodologia projektowanie jest naukę indukcyjną (naukę empiryczną),czyli taką, w której dopuszcza się wnioskowanie niededukcyjne jako sposób uzasadniania twierdzeń [94, s. 20], [95, s. 178]. Jako metodę dowodzenia stosuje się wnioskowanie redukcyjne [94, s. 23], ale przede wszystkim wnioskowanie statystyczne, to jest takie, "w którym przesłanka jest opisem wyniku próby, pobranej losowo z danej zbiorowości, a konkluzja (wniosek) jest probabilistyczną charakterystyką tej zbiorowości" [94, s.21-23].Podstawowym narzędziem jest intuicja badacza i weryfikacja empiryczna.Stwierdzenie, czy hipoteza została uzasadniona należycie pozostanie sprawę oceny i sumienia badacza.

W tej pracy większość tez ma charakter postulatywny,twierdzenia uzasadniane są statystycznie, za pomocę badania literatury, rozmów z projektantami i badaczami projektowania, autopsji i wreszcie introspekcji autora. W wielu przypadkach dowodzenie opiera się na stwierdzeniu, że nie można znaleźć przypadków przeczących tezie.

Zasadność pracy polega na wyróżnieniu typowych czynności i ich analizie doprowadzającej do definicji, identyfikacji celów i warunków tych czynności i postulowania odpowiednich procedur oraz wykazywaniu ich racjonalności.

2. PROCES PROJEKTOWANIA

2.1. Projektowanie jako proces

Przez projektowanie rozumie się w tej pracy proces.Obejmuje on wszystkie czynności, zmierzające do obmyślenia sposobu zaspokojenie pewnej potrzeby, przy czym wiąże się to z koniecznością obmyślenia (zaprojektowania, skonstruowania) urządzenia (czy zespołu urządzeń) oraz podania instrukcji eksploatacji tego urządzenia [59], [21], [12], [26].

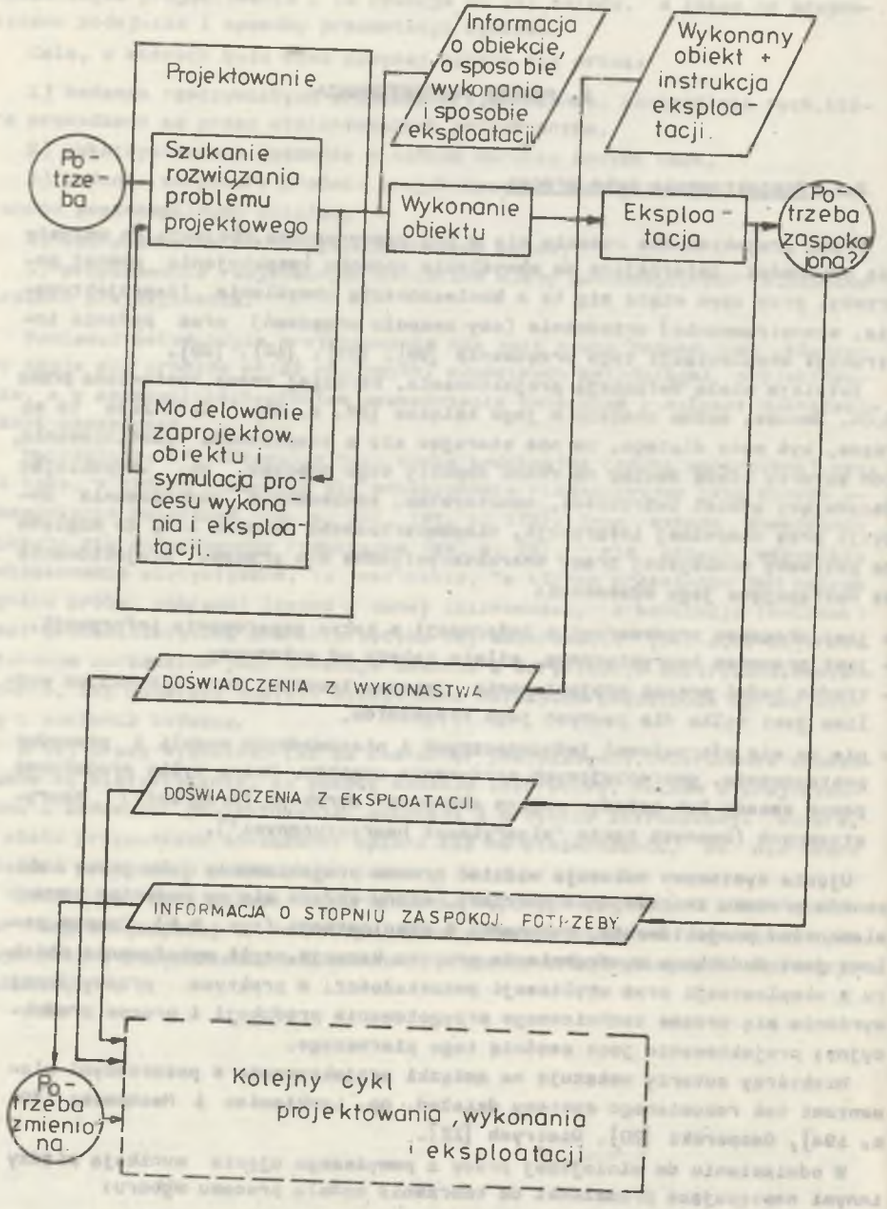
Istnieje wiele definicji projektowanie. Bardziej znane,zestawione przez J.Ch. Jonesa, można znaleźć w jego książce [28, s. 20]. Definicje te są różne, być może dlatego, że nie starając się o kompletność zdefiniowania, ich autorzy kładą nacisk na różne aspekty tego procesu, np. uwypuklając decydujący udział twórczości, nowatorstwo, konieczność podejmowania decyzji przy niepełnej informacji, niepowtarzalność działań itd. Ze względu na potrzeby niniejszej pracy charakterystyczne dla procesu projektowania są następujące jego własności:

- jest procesem przetwarzania informacji a także generowania informacji,
- jest procesem heurystycznym, silnie zależy od wykonawcy,
- trudno badać proces projektowania, jeszcze trudniej formalizować,co możliwe jest tylko dla pewnych jego fragmentów,
- nie da się sformułować jednoznacznych i niezawodnych modeli i procedur postępowania, gwarantujących otrzymanie wyników. Można tylko proponować pewne zasady lub metody, mające charakter dyrektyw (programów) heurystycznych (zwanych także "algorytmami heurystycznymi").

Ujęcie systemowe nakazuje widzieć proces projektowania jako jeden z elementów procesu zaspokojenia potrzeby, który składa się co najmniej z trzech elementów: projektowania, wykonania i eksploatacji (rys. 2.1). Czasem celowe jest dodatkowe wyodrębnienie procesu kasacji,czyli wycofywania obiektu z eksploatacji oraz utylizacji pozostałości. W praktyce przemysłowej wyróżnia się proces technicznego przygotowania produkcji i proces produkcyjny; projektowanie jest częścią tego pierwszego.

Niektórzy autorzy wskazują na związki projektowania z pozostałymi elementami tak rozumianego systemu działań, np. Lenkiewicz i Machowski [39, s. 194], Gasparski [20], Dietrych [12].

W odniesieniu do niniejszej pracy z powyższego ujęcia wynikają między innymi następujące przesłanki do tworzenia modelu procesu wyboru:



Rys. 2.1. Proces zaspokajania potrzeb: system działaniowy

- proces projektowania jest podporządkowany procesowi zaspokajania potrzeb,
- w kolejnych cyklach projektowania tego samego obiektu może być uzasadnione stosowanie różnych systemów wartości, zależnie od wniosków wynikających z badania stopnia zaspokojenia potrzeby.

Z kolei zwróćmy uwagę, że systemowe ujęcie projektowania nakazuje jednocześnie analizować trzy jego aspekty:

- proces projektowania,
- przedmiot projektowania (projektowany obiekt),
- podmiot projektowania (projektant, system projektujący).

W zasadniczej części pracy będziemy brać pod uwagę wszystkie trzy aspekty:

a) uwzględniając ich wpływ na proponowane procedury,
b) wyróżniając w projektowaniu trzy rodzaje zadań wyboru, dotyczące odpowiednio: sposobu postępowania, rozwiązania projektowego, zespołu projektującego.

Projektowanie napotyka na wiele barier, które można podzielić na dwie główne grupy, zależnie od źródła:

1) osobowe, właściwe samemu projektantowi, wśród których można wyróżnić bariery subiektywne [26], [69] oraz obiektywne, jak brak dostatecznej wiedzy,

2) zewnętrzne (organizacyjne), niezależne od projektanta, np. niedostępność pewnych ważnych informacji lub ich brak.

W aspekcie niniejszej pracy istotne wydają się między innymi następujące bariery:

ad 1) - brak umiejętności dokonywania wyboru (np. formułowania zadania wyboru czy optymalizacji) i brak wiedzy o istniejących metodach lub nieumiejętność ich wykorzystania;
- rutyna, doraźność działania, myślenie stereotypami,
- lenistwo, akceptowanie "pierwszego lepszego" rozwiązania;
- podatność na wpływy autorytetów;
- nieumiejętność odrzucania ograniczeń czy wymagań pozornych.

ad 2) - wymuszanie decyzji przez kierownictwo,
- brak czasu i środków na wybór, na projektowanie wielowariantowe, na modelowanie, na optymalizację, na ekspertów;
- złe tradycje, brak wymagań proceduralnych (np. brak wymagania dokumentacji wyboru).

2.2. Wymagania stawiane przedmiotom, podmiotom i procesom projektowania [68]

Wymagania stawiane obecnie różnią się od tradycyjnych nie tylko tym, że są coraz ostrzejsze. Pojawiają się wymagania jakościowo nowe, wynikające z tego, że ustawicznie rośnie wielkość projektowanych urządzeń i systemów w sensie rozległości i różnorodności obejmowanej tematyki, a także w sensie komplikowości i ponoszonych kosztów, (np. kocioł parowy wczoraj i dziś).

Rośnie wielkość produkcji (seryjność), zatem rośnie zasięg określonej konstrukcji. Coraz więcej ludzi zainteresowanych jest wytworami o tej samej konstrukcji. Ewentualne błędy powielają się, np. w projektach budynków typowych czy w środkach transportu.

Rośnie różnorakość i siła powiązań projektowych urządzeń i systemów z otoczeniem. Są to powiązania nie tylko technologiczne, ale także ekonomiczne, społeczne, kulturalne i wpływ na naturalne środowisko.

Ponadto żąda się coraz krótszych czasów projektowania. Wynika to nie tylko z doraźnej sytuacji rynkowej (konkurencja wśród jednostek projektujących), lecz także z szybkiego ekonomicznego i "moralnego" starzenia się konstrukcji, spowodowanego szybkim postępem w metodach wytwarzania i szybkimi zmianami warunków eksploatacji.

Powyższe żądanie w odniesieniu do rezultatów projektowania narzucają nowe wymagania w stosunku do systemu projektującego, jak:

1) konieczność angażowania dużej liczby projektantów do jednego zadania,

2) konieczność angażowania specjalistów z różnych dziedzin do jednego zadania,

3) konieczność angażowania dużych środków finansowych,

4) najwyższa jakość projektowania.

Z tych wymagań wynikają nowe żądania w stosunku do procesu projektowania. Celem niniejszej pracy jest odpowiedź na niektóre z nich, a w szczególności ułatwienie takich działań, jak:

- planowanie, koordynacja i kierowanie procesem projektowania;
- kształcenie projektantów;
- opracowanie i wdrażanie nowych metod: wydajnych, przydatnych do wykorzystania w grupie, umożliwiających wspomaganie komputerowe;
- optymalizacja rezultatów projektowania, a także samego procesu projektowania;
- "algorytmizacja" intuicji twórcy;
- uporządkowanie zbierania i przechowywania doświadczeń z poprzednich prac projektowych i informacji z otoczenia.

2.3. Klasyfikacja zadań projektowych

W tej pracy interesuje nas klasyfikacja zadań projektowych ze względu na potrzeby metodologii. Klasyfikacja ta ma ujawnić różnice i podobieństwa w przebiegu różnych procesów projektowania.

Odmienność leży przede wszystkim w strukturze i organizacji procesu oraz w doborze najwłaściwszych szczegółowych metod postępowania. Rodzaj zadania wpływa też na dobór systemu projektującego (podmiotu projektowania) oraz na zakres i szczegółowość projektowania.

Przegląd spotykanych klasyfikacji

Bąbiński [2, s. 51] wyróżnia projektowanie wyrobów (wytworów) i procesów, dzieląc je z kolei według tradycyjnych gałęzi nauki i techniki na: mechaniczne, budowlane, energetyczne itd. Dzieli też projektowanie według stopnia ważności przedmiotu projektowanego: od elementarnych, do zespołów elementarnych wyrobów niejednorodnych.

Wilsonowie [90, s. 12] za kryterium podziału zadania projektowego przyjmują to, co jest w tym zadaniu dane, a co szukane: czy wejście, czy wyjście, czy system (urządzenie). Zestawiając różne przypadki, otrzymują 8 charakterystycznych rodzajów problemów projektowych.

Dietrych [11, s. 192] przedstawił najbardziej konsekwentną i obejmującą całość zadań projektowych systematykę, rozpatrując działania na wytworach i następnie na utworach. Rodzaje działań na wytworach różnią się w zależności od tego, czy ich wejście, wyjście i operator działania jest znane i może być tylko jedno, jest znane i może być różne, jest nieznane i należy je znaleźć. W ten sposób powstałe 27 kombinacji przedmiotów projektowanie staje się podstawą wyróżnienia różnych działań projektowych, czyli działań na utworach, z których tylko wybrane mają znaczenie praktyczne. Zdefiniowano działania stereotypowe, działania odtwórcze i działania twórcze: od najprostszych, gdzie dla znanego środka technicznego należy znaleźć nowe wejścia i wyjścia aż do najogólniejszych, których celem jest badanie nowych metod projektowania i konstruowania.

W sprawie podziału zadań projektowych pisali również Krick [37], Hill [26], Sielecki [59], Dorosiński [14]. W pracach Jonesa [28, s. 79] i Kaufmanna [30, s. 98] nie ma wprawdzie rozważań na temat klasyfikacji, jest jednak coś więcej: uwagi co do sposobu wybierania metod działania w poszczególnych przypadkach.

Zadaniem autora, istotne z punktu widzenia praktycznego projektowania są następujące własności zadania projektowego.

1. Zadanie może być proste lub złożone. Proste jest wówczas, gdy może je rozwiązać jeden specjalista, ponieważ w projektowanym urządzeniu zachodzą podobne zjawiska (np. mechaniczne czy chemiczne), a urządzenie nie

zawiera wielu różnych elementów (np. mniej r 100). Przykłady: zegarek mechaniczny, aparat telefoniczny, prosta za .a.

2. Zadanie może być klasyczne lub nowe. yczne jest wtedy, gdy podobne zadania były już wcześniej z powodzen rozwiązane i istnieje doświadczenie. Odmianą tego rozróżnienia jest :y koncepcja (idea) rozwiązania jest znana, czy całkiem nowe. Nie zaw jednak możemy to ustalić przed rozpoczęciem prac projektowych.

Ze względu na nowość możemy wyróżnić całą gamę sytuacji: od prac rutynowych, powtarzalnych (np. suwnica, dom mieszkalny), przez adaptację nowych rozwiązań do starych celów w nowych warunkach, adaptację do nowych celów - aż do nowych konstrukcji do nowych celów.

3. Ze względu na organizację prac projektowych jest też istotne czy zadanie projektowe polega na znalezieniu nowej konstrukcji, czy jest wyraźnie ograniczone do ulepszenia istniejącej. Często chodzi tylko o niewielkie modyfikacje już istniejącego wytworu.

4. Zadanie może być zdefiniowane lub niezdefiniowane. To pierwsze może być opisane ilościowo lub nie.

5. Celem projektowania jest wytwór, który ma służyć jednemu znanemu odbiorcy i jednemu użytkownikowi lub użytkownikowi anonimowemu. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z wytwarzaniem jednostkowym, czasem seryjnym (np. dla wojska). W drugim przypadku wytwór jest wprowadzany na rynek i tam konkuruje z innymi, użytkownik ani warunki użytkowania nie są dobrze znane.

6. Wytwór może być wytwarzany jednostkowo, seryjnie lub masowo przez znanego lub nieznanego producenta.

Wydaje się, że podział zadań ze względu na rodzaj obiektu (np. fabryki, usługi, przyrządy, zabawki itp.) oraz na branże (chemia, energetyka, górnictwo itp.) lub rodzaj energii jest drugorzędne.

Dla przykładu typowe dla projektowania urządzeń i systemów pomiarowych, informatyki, automatyki i drobnych konstrukcji są następujące zadania.

1. Zaprojektowanie systemu pomiarowego, który pobiera informacje od czujników, przetwarza, rejestruje i wysyła informacje.

2. Zaproponowanie systemu automatycznej kontroli procesu przemysłowego lub sterowania obiektami. System automatyki kompleksowej.

3. Zaproponowanie systemu informatycznego przetwarzania i przechowywania informacji (CRPD) w przemyśle, administracji i in.

4. Modyfikacja jednego z tych systemów, np. przez zmianę relacji między tymi samymi elementami systemu.

5. Zaprojektowanie urządzenia o zadanych parametrach.

6. Modyfikacja urządzenia.

7. Znalezienie nowych zastosowań dla danego urządzenia (np. regulatora przemysłowego) lub danego systemu (np. jakie nowe wytwory może produkować ta sama fabryka?).

8. Opracowanie pewnej strategii postępowania w celu osiągnięcia żądanego efektu (czy informacji), np. identyfikacja obiektu, uruchamianie systemu, uruchamianie produkcji, prowadzenie badań prototypu.

9. Opracowanie sposobu nakłonienia ludzi do pewnych działań lub postaw (np. poprzez system uczenia, systemy propagandowe, reklamowe).

10. Znalezienie nowych systemów lub urządzeń, które można by przygotować lub wykonać i sprzedać (typowe dla placówek badawczo-konstrukcyjnych i innych usługowych).

2.4. Struktura procesu projektowania [79]

Przedmiotem niniejszego rozdziału jest analiza procesu projektowania ze względu na występowanie w tym procesie sytuacji decyzyjnych. Strukturą procesu nazywamy tu porządek działań, wyróżnionych ze względu na określone kryterium. Jest to zgodne z ogólnie przyjętą definicją, która przez strukturę rozumie całokształt stosunków między elementami a całością, rozpatrywany z określonego względu.

W celu zaproponowania modelu procesu rozwiązywania zadania wyboru w projektowaniu (p. 3.6) należy dokonać analizy struktury całego procesu projektowania ze względu na rodzaje czynności.

Interesujące jest tu: jakie czynności zwykle występują, jakie są ich uwarunkowania zewnętrzne i jaka jest ich kolejność.

Zakładamy, że proces projektowania jest procesem dyskretnym, zatem że jest etapowy i podzielny.

1. Etapowy. Chronologicznie realizuje się kolejne fazy (np. projekt studialny, koncepcyjny, wstępny, roboczy, wykonanie i badanie prototypu itd.), zakończone ważnymi globalnymi decyzjami. Taka struktura nazywana jest zwykle makrostrukturą [59] procesu projektowania.

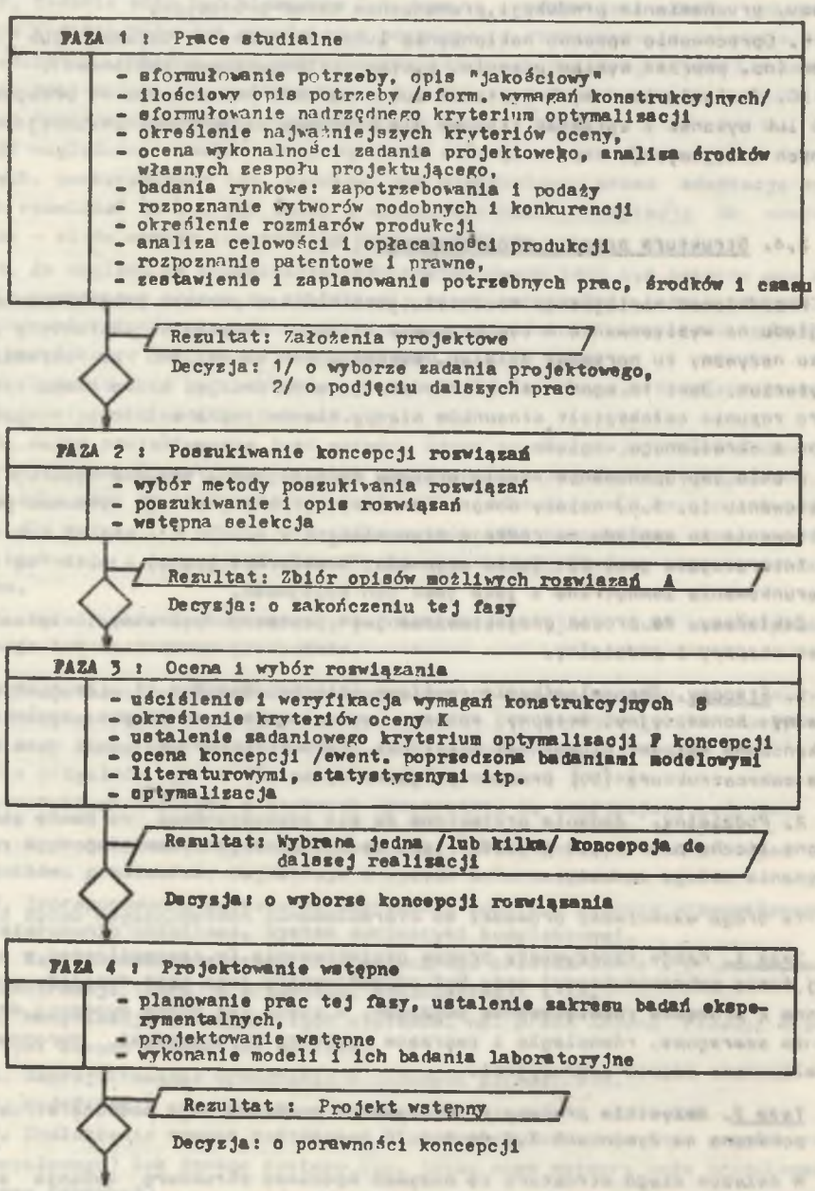
2. Podzielny. Zadanie projektowe da się zdekomponować na pewną skończoną liczbę prostszych podzadań tak, że złożenie ich rozwiązań daje rozwiązanie całego zadania.

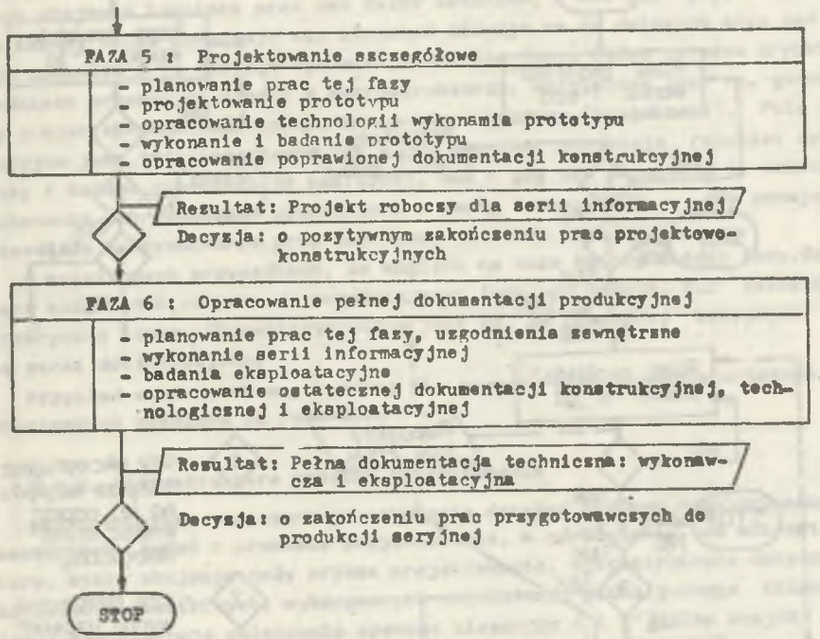
Ta druga właściwość prowadzi do sformułowania następujących dwóch tez:

Teza 1. Każdy rzeczywisty proces projektowania (w szczególności w każdej fazie makrostruktury) może być przedstawiony jako sieć działań, utworzona z procesów rozwiązywania podzadań. W sieci tej można wyróżnić działania szeregowe, równoległe i tworzące pętle ze sprzężeniami zwrotnymi, realizowane często iteracyjnie.

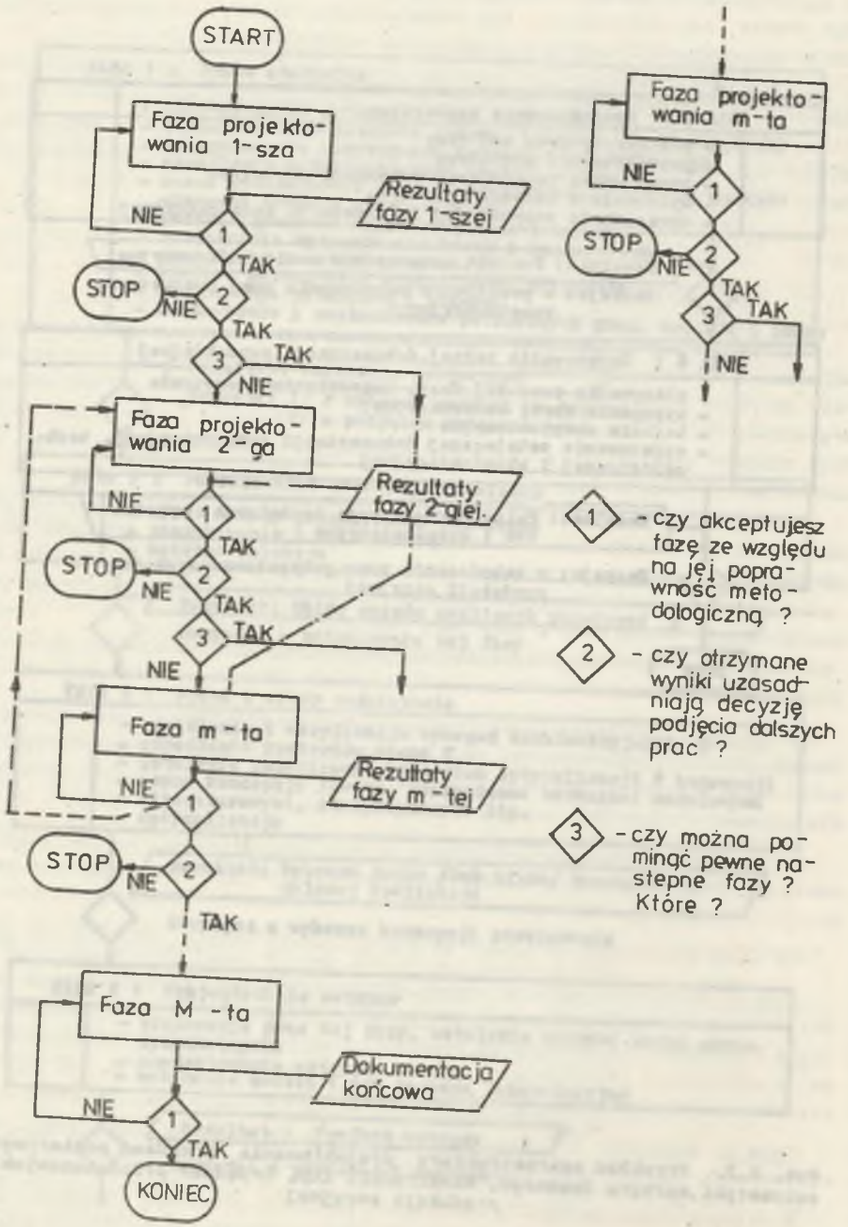
Teza 2. Wszystkie procesy rozwiązywania podzadań mają podobną strukturę pokazaną na rysunkach 2.2 do 2.5.

W dalszym ciągu strukturę tę nazywać będziemy strukturą zadania elementarnego albo mikrostrukturą zadania [59]. Analiza tej struktury umożliwi utworzenie modelu procesu rozwiązywania zadania wyboru.





Rys. 2.3. Przykład makrostruktury projektowania urządzeń pomiarowych, automatyki, sprzętu domowego, elektroniki itp. urządzeń przeznaczonych do produkcji seryjnej



Rys. 2.2. Makrostruktura procesu projektowania

2.4.1. Makrostruktura procesu projektowania

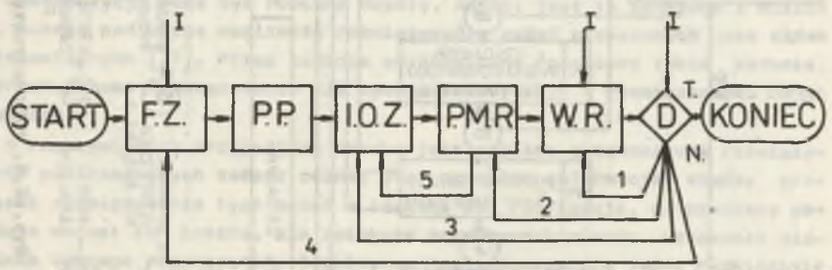
Z wielu względów praktycznych [77] proces projektowania prowadzi się z reguły w wielu fazach, realizowanych sekwencyjnie. Każda faza makrostruktury obejmuje kompleks prac nad całym zadaniem, a nie nad jego częścią. Po każdej fazie podejmuje się kluczowe decyzje co do dalszych prac nad całym zadaniem i te decyzje wyznaczają kolejne fazy, będąc zarazem kryterium podziału procesu na części w makrostrukturze. Decydentem jest np. generalny projektant lub rada techniczna a nie wykonawca (projektant). Pole decyzyjne jest trójelementowe: TAK - gdy decydent akceptuje rezultat danej fazy i zaleca przejście do następnej, NIE - gdy nie akceptuje i nakazuje dokonanie poprawek (lub uzupełnień) w danej fazie, STOP - gdy uznaje za niecelowe kontynuowanie prac nad danym zadaniem (rys. 2.2).

W wyjątkowych przypadkach, ze względu na duże koszty każdej fazy, decydent może żądać powrotu do wcześniejszej fazy, co na rys. 2.2 zaznaczono przerywaną linią. Charakterystyczne jest to, że rezultaty kolejnych faz są coraz dokładniejsze.

Przykład makrostruktury typowej dla procesu projektowania urządzeń mechanicznych pokazano na rys. 2.3.

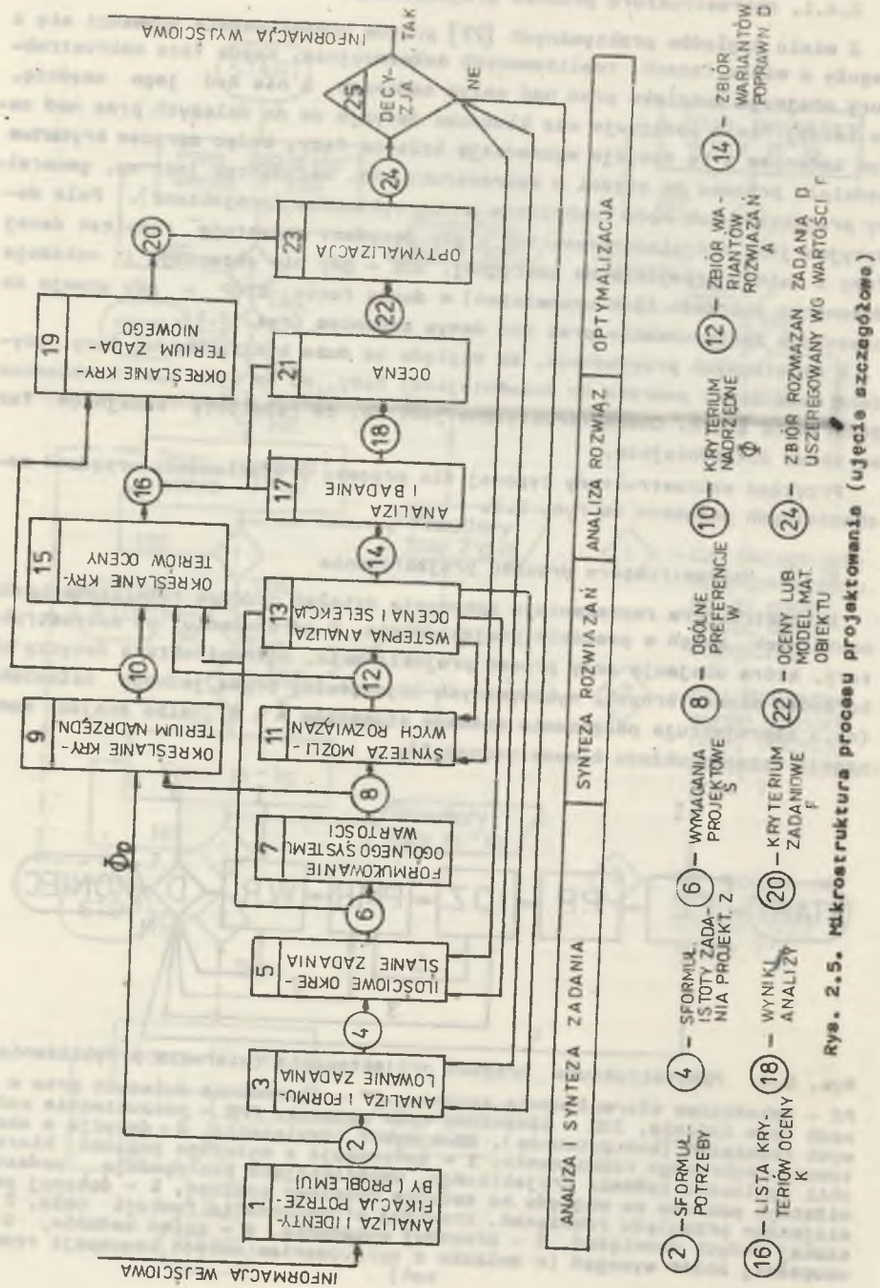
2.4.2. Mikrostruktura procesu projektowania

Mikrostruktura reprezentuje sekwencję działań podczas rozwiązywania elementarnych zadań w procesie projektowania. W odróżnieniu od makrostruktury, która obejmuje cały proces projektowania, mikrostruktura dotyczy tylko zadań elementarnych, wykonywanych najczęściej przez jednego człowieka (np.: zaprojektuje połączenie spawane elementów A i B", albo znajdź koncepcję wstępną układu kinematycznego").



Rys. 2.4. Mikrostruktura procesu projektowania (pierwsze przybliżenie):

FZ - jakościowe sformułowanie zadania, PP - planowanie dalszych prac w ramach tego zadania, IOZ - ilościowy opis zadania, PMR - poszukiwanie możliwych rozwiązań (koncypowanie), WR - wybór rozwiązania, D - decyzja o akceptowaniu wybranego rozwiązania, I - informacje z wyższego poziomu hierarchii ogólności zadania projektowego, umożliwiające koordynację podzadań niższego poziomu ze względu na zadanie wyższego poziomu, 1 - dokonaj pełniejszego przeglądu rozwiązań, zrewiduj sformułowanie funkcji celu, 2 - szukaj nowych rozwiązań, 3 - zrewiduj wymagania, 4 - zmień zadanie, 5 - uzupełnij zbiór wymagań (w związku z opracowaniem nowych koncepcji rozwiązań)



Rys. 2.5. Mikrostruktura procesu projektowania (ujęcie szczegółowe)

Kryterium podziału na poszczególne elementy tej struktury jest odmienność działań. Żaden etap w tej strukturze nie może być pominięty. Ma ona charakter iteracyjny i rekurencyjny (rys. 2.4).

Na rys. 2.5 pokazano dokładne ujęcie tej struktury, uwypuklając działania związane z wyborem. Prostokąty oznaczają procesory przetwarzania informacji, koła - zbiory informacji (rezultaty kolejnych działań), romb - blok decyzyjny. Strzałki oznaczają wzajemne powiązania i kolejność działań. Pas środkowy jest głównym torem przetwarzania informacji, pas górny jest torem kształtowania systemu wartości, a pas dolny pokazuje doskonalące sprzężenia zwrotne, realizowane w kolejnych iteracjach.

2.4.3. Dekompozycja zadania projektowego

Realizując kolejne działania mikrostruktury, projektant dochodzi do jednego z głównych etapów, jakim jest poszukiwanie (synteza) możliwych rozwiązań (blok 11, rys. 2.5). Najpierw stara się podzielić dane zadanie Z na zbiór zadań składowych, zwanych dalej podzadaniami lub zadaniami częściowymi: $Z = \{Z_1,\ldots,Z_n,\ldots,Z_N\}$.

Są to zadania, które projektant uznaje za łatwiejsze do rozwiązania, gdyż są to zadania o mniejszej wymiarowości albo takie, które mają znane zbiory rozwiązań. Dla każdego z zadań częściowych Z_n formułuje się osobny cel (WE_n, WY_n), osobne ograniczenia Ω_n i osobny system wartości W_n (rys. 2.6).

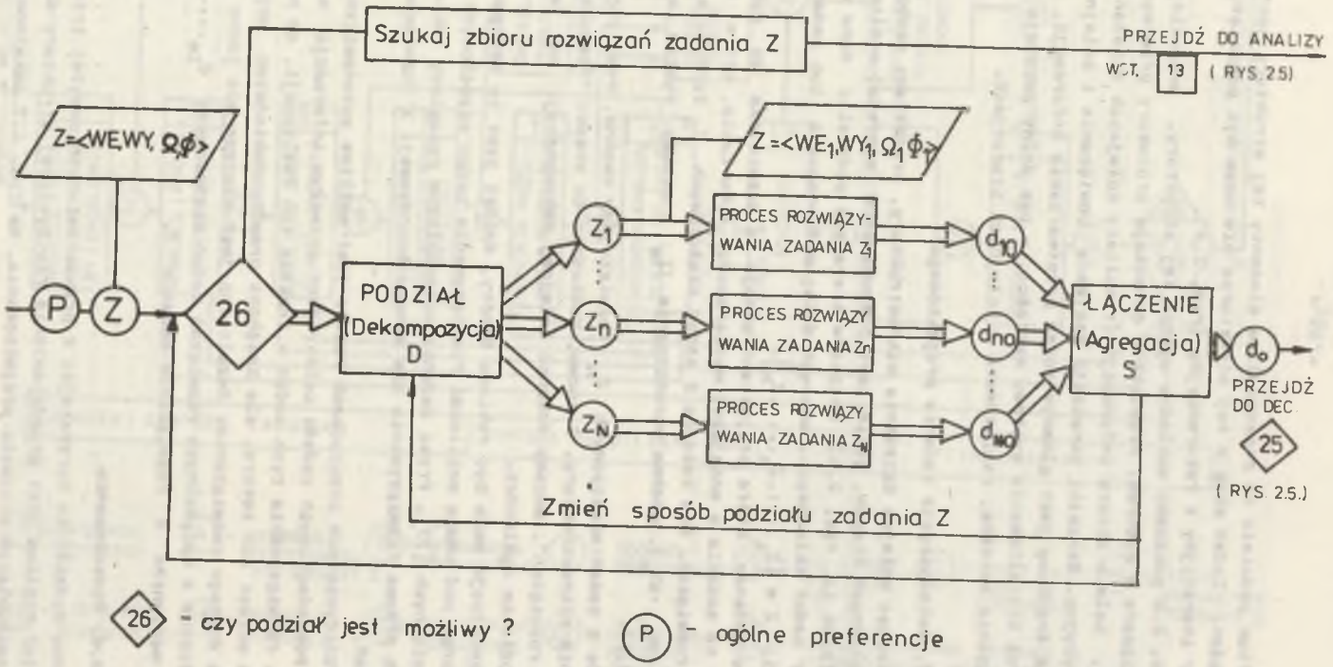
Każde z zadań częściowych Z_n rozwiązujemy osobno, realizując kolejne działania mikrostruktury. I znowu, dochodząc do etapu: "Poszukiwanie możliwych rozwiązań", możemy dokonać kolejnej dekompozycji na jeszcze niższym poziomie ogólności.

Dekompozycja może być robiona dopóty, dopóki jest to sensowne i możliwe, biorąc pod uwagę możliwość rozwiązywania zadań częściowych jako zadań autonomicznych [77]. Przez zadania autonomiczne rozumiemy takie zadania, których proces rozwiązywania nie wymaga koordynacji z rozwiązaniami innych podzadań.

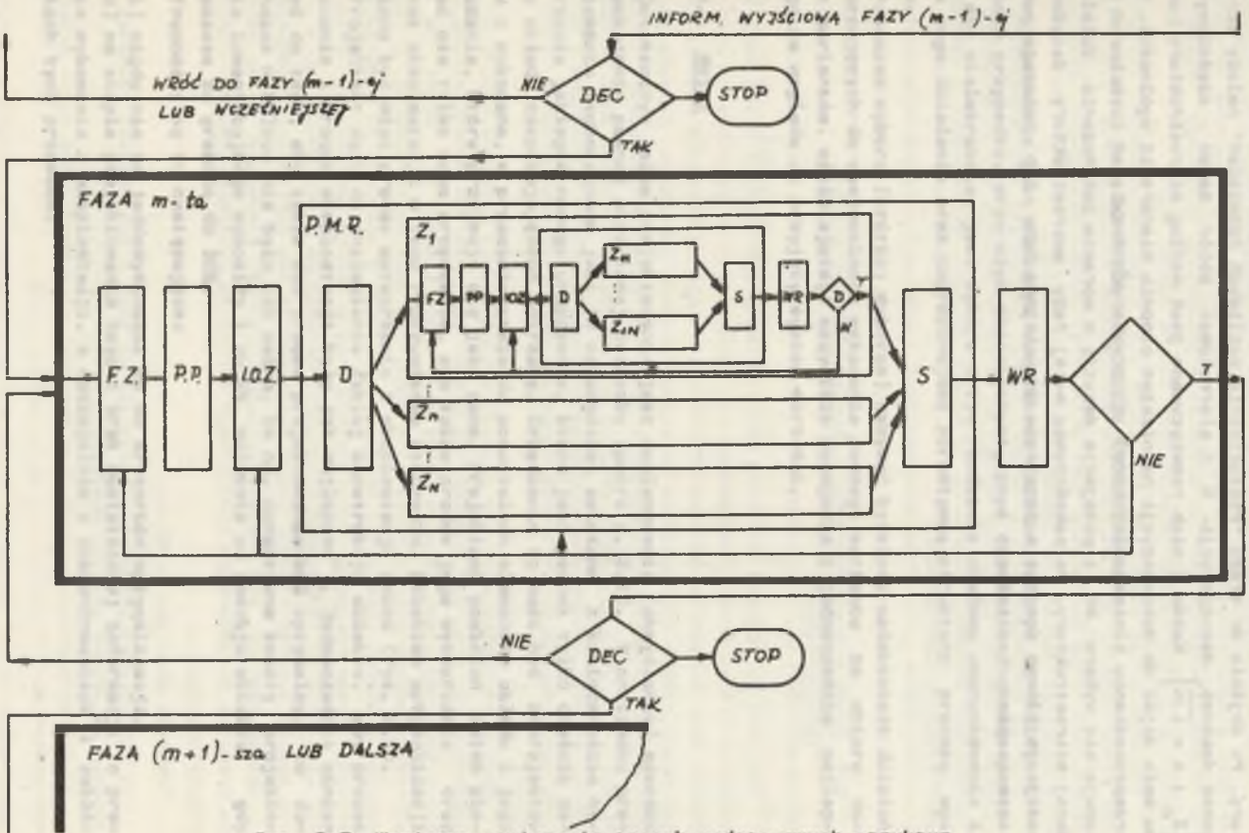
W rzeczywistych przypadkach rzadko jest możliwe autonomiczne rozwiązywanie poszczególnych zadań: celowy jest przepływ informacji między procesami rozwiązywania tych zadań w trakcie ich realizacji, co niestety powoduje wzrost ich kosztu, ale zwiększa prawdopodobieństwo uzyskania globalnie dobrego rozwiązania. Rezultatem jest wówczas nie jedno rozwiązanie d_o złożone z optymalnych rozwiązań zadań częściowych $d_{1o},\ldots,d_{No}$, lecz zbiór wariantów A rozwiązania zadania Z.

2.4.4. Podsumowanie

Można sądzić, że korzystając z przedstawionych powyżej trzech modeli struktur możliwe jest przedstawienie rzeczywistej struktury działań w każdym rzeczywistym procesie projektowania. Na rys. 2.7 pokazano wzajemne relacje między trzema strukturami.

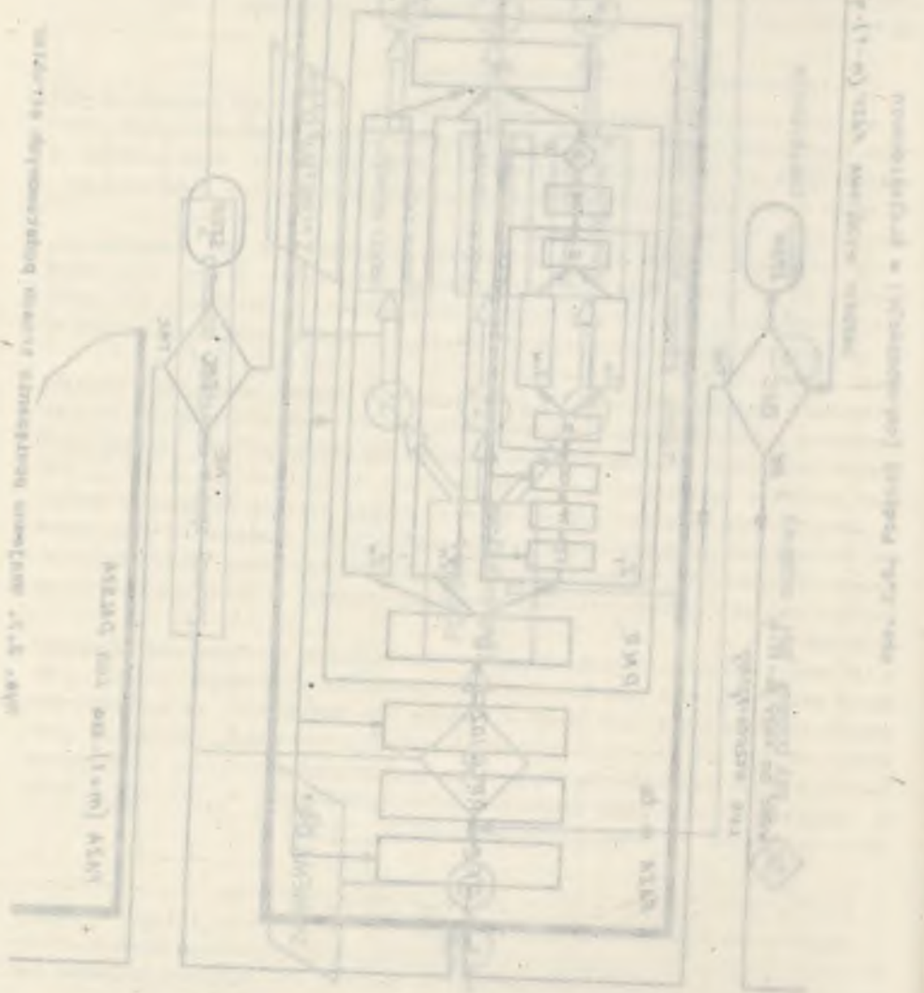


Rys. 2.6. Podział (dekompozycja) w projektowaniu



Rys. 2.7. Wzajemne powiązania trzech podstawowych struktur

Każda faza makrostruktury powinna być realizowana zgodnie z mikrostrukturą. Po dojściu do etapu "Poszukiwanie możliwych rozwiązań" należy spróbować dokonać dekompozycji D i sformułować zbiór zadań częściowych $\{z_n : n = \overline{1,N}\}$. Każde z nich rozwiązywane jest według mikrostruktury i znowu może dojść do dekompozycji na niższym stopniu hierarchii ogólności. Po przeprowadzeniu złożenia (syntezy) S uzyskanych rozwiązań częściowych dokonuje się wyboru WR i podejmuje decyzję w sprawie zakończenia działań danej mikrostruktury. Po zakończeniu m-tej fazy makrostruktury decydent podejmuje główną decyzję o przejściu do kolejnej fazy lub nakazuje powtórzenie pewnych działań.



3. WYBÓR W PROCESIE PROJEKTOWANIA

Projektowanie jest złożonym kompleksem działań, różnym w każdym konkretnym przypadku, przy czym charakterystycznym działaniem, które powtarza się wielokrotnie, jest wybór. W tym rozdziale zbadamy uwarunkowania i cele tego działania oraz zaproponujemy normatywną strukturę procesu wyboru.

Procesem wyboru (krótko: wyborem) nazywać będziemy całokształt działań, zmierzających do racjonalnego wskazania pewnego wariantu ze zbioru danych wariantów, spełniającego wszystkie wymagania i jednocześnie najlepszego ze względu ne przyjęty system wartości.

3.1. Wstęp

Ostatecznym celem projektowania jest zaplanowanie (obmyślenie) sposobu zaspokajania pewnej określonej potrzeby (patrz p. 2.1). W przypadku projektowania technicznego jest to najczęściej związane z koniecznością wytworzenia jakiegoś nowego urządzenia, które jest jednak tylko częścią całego układu zaspokajającego potrzebę. Urządzenie to musi być zaprojektowane i wykonane, w przeciwieństwie do pozostałych elementów układu i jego otoczenia, które przyjmuje się jako dane. Projektant powinien zatem planować nie tylko nowe urządzenie, ale także proces jego wytwarzania oraz proces eksploatacji w jego rzeczywistym otoczeniu. Obiektem optymalizacji powinny być więc procee wytwarzania i eksploatacji razem (rys. 2.1).

Projektant dąży do znalezienia takiej konstrukcji obiektu, aby proces wykonania i proces eksploatacji były jak najlepsze[x]. Jednocześnie winien dążyć do tego, aby także sam proces projektowania był optymalny, co dotychczas w Polsce nie było tak ważne, bo np. normatywne koszty projektowania inwestycyjnego wynosiły 1 do 4%, zależnie od rodzaju obiektu, gdy tymczasem za granicą do 30%.

Trudności są tu następujące:

1) nigdy nie ma jednomyślności co do kryteriów optymalizacji,

2) na etapie projektowania często brak dostatecznej informacji o procesie wykonania i eksploatacji, a szczególnie o uwarunkowaniach i zakłóceniach tych procesów.

---

[x] Rozdz. 5 objaśnia znaczenie słowa "najlepsze".

Trudność pierwszę pokonuje się przez przyjmowanie zbioru kryteriów, następnie polioptymalizację i intuicyjne wyznaczanie rozwiązania optymalnego ze zbioru kompromisów lub określanie sztucznego złożonego skalarnego kryterium optymalizacji (o czym jest mowa w rozdz. 5).

Trudność drugę częściowo przełamuje się, sterując procesem projektowanie przez objęcie go informacyjnym sprzężeniem zwrotnym (rys. 2.1), choć skuteczność tego sprzężenia jest dość ograniczona, gdyż pełne informacje mogą dopłynąć dopiero po zakończeniu projektowania.

Dlatego wykorzystuje się doświadczenia, pochodzęce z wytwarzania i eksploatacji innych, podobnych obiektów, a także stosuje się modelowanie projektowanego obiektu. Często są to modele opisowe, szczególnie w początkowych fazach projektowania.

3.2. Wybór a wieloetapowość i hierarchiczność procesu projektowania

Idealnym ze względu na wybór przypadkiem projektowania byłby taki przypadek, w którym wybór rozwięzania jest dokonywany na zakończenie projektowania, tzn. wszystkie możliwe całościowe wersje rozwiązania zadania projektowego byłyby doprowadzone do etapu projektu roboczego. Oznacza to, że cały proces projektowania miałby tylko jednę fazę makrostruktury (patrz p. 2.4). Nie jest to jednak możliwe ze względu na koszty i czas projektowania. Ponadto konieczność podziału prac między wielu wykonawców i konieczność zmniejszenia wymiarowości zadania prowadzi do dekompozycji tego zadania.

Analizując modele struktur procesu projektowania pokazano w p. 2.4, a w szczególności rys. 2.7 widzimy, że proces ten może być przedstawiony w postaci złożonej sieci działań, przy czym każdy element tej sieci da się opisać schematem mikrostruktury. W sieci tej jest wiele decyzji, o różnym stopniu ważności (mierzonej stopniem ogólności w stosunku do podstawowego zadania danego procesu projektowania) oraz o różnej dokładności informacji (zależnie od fazy makrostruktury). Decyzje te podejmowane są w różnym czasie i przez różnych ludzi, najczęściej bez możliwości koordynacji.

Żądamy mimo to, aby wszystkie te decyzje były optymalne w tym sensie, że prowadzą do uzyskania optymalnego rezultatu końcowego danego procesu projektowania.

Powstaję więc dwa problemy:

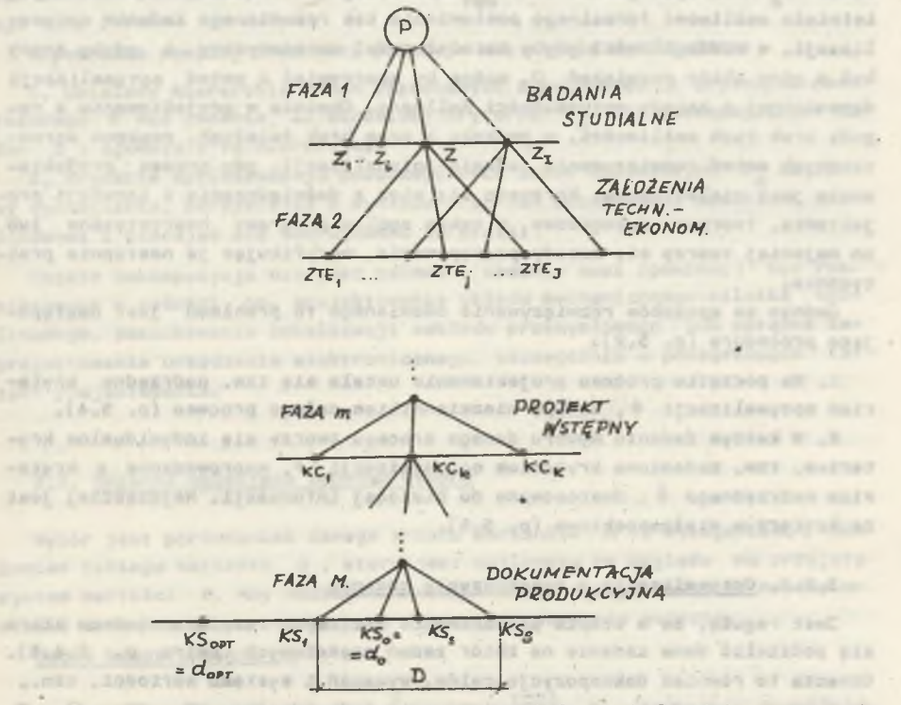
1) jak dzielić proces projektowania na fazy i jak dzielić zadania na zadania częściowe podczas dekompozycji,

2) jak podejmować poszczególne decyzje, w szczególności jakie przyjmować kryteria.

3.2.1. Optymalizacja a etapowość procesu projektowania [77]

Obserwacja działań praktycznych wskazuje, że proces projektowania jest ciągiem działań, składającym się ze skończonej liczby sekwencyjnie następujęcych po sobie faz, rozdzielonych decyzjami dotyczęcymi całego problemu projektowego P (rys. 3.1). Zakres prac w poszczególnych fazach dobiera się tak, aby zminimalizować prawdopodobieństwo konieczności podjęcia decyzji nakazującej po fazie m-tej powtórzenia fazy m-1-szej lub wcześniejszej. Podział ten określony jest zwykle przepisami. Dla przykładu faza pierwsza prowadzi do sformułowania zadania Z, faza druga do określenia założeń techniczno-ekonomicznych $(ZTE)_j$, w późniejszej fazie ma zostać znaleziona koncepcja $(KC)_k$ itd., tak aby w ostatniej fazie uzyskać dokumentację produkcyjnę, czyli jednoznacznie określonę konstrukcję KS. Ma ona odpowiedni stopień szczegółowości i wiarygodności, wymagany w procesie wytwarzania i eksploatacji.

Mając dany problem P, możemy go przekształcić w wiele różnych zadań $\{Z_i : i = \overline{1,I}\}$, z kolei każde zadanie Z_i może stać się podstawę opracowanie wielu różnych wersji założeń $\{ZTE_j : j = \overline{1,J}\}$ itd. Są to zawsze



Rys. 3.1. Etapowy i dywergencyjny charakter kolejnych faz i konwergencyjnego działania następujęcych po nich decyzji

zbiory ograniczone, najczęściej skończone, w szczególności w pierwszych fazach projektowania. Ze względów praktycznych (ograniczone koszty i czas projektowania) należy po każdej fazie wybrać tylko jedną wersję (z wyjątkiem przypadków szczególnych, gdy przez kilka faz możemy pracować nad kilkoma wersjami).

W każdej fazie, przygotowując jej decyzję końcową, prowadzi się optymalizację wg odpowiednio zmienionego kryterium optymalizacji F_m, wybierając rozwiązanie optymalne: Z_o, ZTE_o, KC_o itd., aby wreszcie w ostatniej fazie wybrać rozwiązania optymalne $KS_o = d_o$ w zbiorze $D = \left\{ KS_s : s = \overline{1,S} \right\}$. Zauważmy, że zmiana decyzji w dowolnej fazie poprzedzającej przyniesie inny zbiór rozwiązań końcowych D oraz że każda decyzja pośrednia zawęża zbiór rozpatrywanych rozwiązań w następujących po niej fazach.

Gdyby nie podejmować decyzji pośrednich, otrzymano by niezwykle wielki zbiór rozwiązań końcowych, będący zbiorem wszystkich rozwiązań danego problemu P. Niech rozwiązaniem optymalnym w takim zbiorze będzie KS_{opt} (optimum globalne). Zasadniczym pytaniem jest, jak podejmować decyzje pośrednie, aby uzyskać to rozwiązania globalnie optymalne lub przynajmniej doprowadzić do tego, aby z odpowiednio dużym prawdopodobieństwem rozwiązanie d_o nie było gorsze od d_{opt} o więcej niż o zadaną wartość. Gdyby istniała możliwość formalnego postawienia tak rozumianego zadania optymalizacji, w szczególności gdyby istniał model matematyczny i gdyby znany był z góry zbiór rozwiązań D, można by skorzystać z metod optymalizacji dynamicznej i zasady optymalności Bellmana. Obecnie w projektowaniu z reguły brak tych możliwości, w związku z czym brak ścisłych, naukowo ugruntowanych metod rozwiązywania zadania optymalizacji, gdy proces projektowania jest wieloetapowy. Korzysta się więc z doświadczenia i intuicji projektanta, tworząc szczegółowe, a także ogólne programy heurystyczne lub co najmniej tworzy się zasady postępowania, weryfikując je następnie praktycznie.

Jednym ze sposobów rozwiązywania omawianego tu problemu jest następująca procedura (p. 5.2):

1. Na początku procesu projektowania ustala się tzw. nadrzędne kryterium optymalizacji Φ, będące niezmiennikiem całego procesu (p. 5.4).
2. W każdym zadaniu wyboru danego procesu tworzy się indywidualne kryterium, tzw. zadaniowe kryterium optymalizacji F, wyprowadzone z kryterium nadrzędnego Φ, dostosowane do bieżącej informacji. Najczęściej jest to kryterium wielokespektowe (p. 5.5).

3.2.2. Optymalizacja a dekompozycja zadania

Jest regułą, że w etapie poszukiwania możliwych rozwiązań twórca stara się podzielić dane zadanie na zbiór zadań częściowych (patrz p. 2.4.3). Oznacza to również dekompozycję celów, wymagań i systemu wartości, tzn., że każdemu podzadaniu Z_n przypisuje się indywidualne WE_n, WY_n, Ω_n, W_n

(rys. 2.6). Należy tak zdekomponować zadanie, aby było prawdziwe założenie, że optymalne rozwiązanie zadania Z jest "złożeniem" optymalnych rozwiązań d_{no} zadań częściowych $\left\{ Z_n : n = \overline{1,N} \right\}$.

Jest to bardzo mocne założenie i dopiero a posteriori i tylko intuicyjnie można sprawdzić, czy zostało w konkretnym przypadku spełnione. Przykładem może być podział maszyny roboczej, np. obrabiarki (Z) na silnik z przekładnię, czyli napęd (Z_1), część roboczą (Z_2), urządzenia podające i odbiorcze (Z_3) oraz układy sterowania, kontroli i blokady (Z_4).

Każde zadanie Z_n rozwiązujemy niezależnie, włącznie z optymalizację i określeniem rozwiązania optymalnego d_{no}. Zatem określenia kryteriów optymalizacji F_n jest czynnością krytyczną dla rozwiązania d_o. Problem ten może być rozwiązany przy wykorzystaniu metod optymalizacji wielopoziomowej [16], [42], jeśli istnieje model matematyczny zadania, co jest jednak rzadkim przypadkiem. Dlatego dekompozycja może być najczęściej tylko intuicyjna i musi być intuicyjnie weryfikowana w etapie AGREGACJA (rys. 2.6).

Dla poszczególnych klas zadań projektowych znane są pewne reguły heurystyczne, ułatwiające tę dekompozycję, np. w tzw. projektowaniu inwestycyjnym zadania dzieli się na branże (projekt budowlany, elektryczny, instalacji c.o. itd.).

Wspomniane powyżej trudności pokonuje się zwykle następująco:

1. Ustalamy hierarchię zadań częściowych i wychodząc z kryterium nadrzędnego Φ dla zadania Z, określamy kryteria Φ_n dla poszczególnych zadań Z_n, zgodnie z tę hierarchię.
2. Kryteria optymalizacji poszczególnych zadań częściowych F_n ustalamy dynamicznie, korzystając z wyników prac nad pozostałymi zadaniami częściowymi i starając się koordynować te prace.

Często dekompozycja nie jest celowa i zadanie musi (powinno) być rozwiązywane w całości, np. projektowanie układu mechanicznego silnika spalinowego, poszukiwanie lokalizacji zakładu przemysłowego lub wstępne zaprojektowanie urządzenia elektronicznego, szczególnie w początkowych fazach projektowania.

3.3. Zmienne opisujące zadanie wyboru

Wybór jest porównaniem danego zbioru wariantów A z wymaganiami i wskazaniem takiego wariantu d_o, który jest najlepszy ze względu na przyjęty system wartości W. Aby umożliwić formalizację takiego zadania należy ustalić zmienne, za pomocą których opisze się powyższe pojęcia.

Cechy konstrukcyjne X

$$X = \left\{ X_p : p = \overline{1,P} \right\} \tag{3.1}$$

to zbiór wielkości, których wartości stanowią konieczny i wystarczający zbiór informacji potrzebny do wykonania i uruchomiania obiektu oraz do prowadzenia remontów.

Zwykle dzieli się je na cechy geometryczne (wymiary, parametry kształtu, gładkości powierzchni itp.), cechy materiałowe (rodzaje tworzyw, informacje o obróbce termicznej i chemicznej, pokrycia powierzchniowe, symbole elementów gotowych czy handlowych itp.) oraz stany początkowe (informacje o sposobie montażu, justowanie, np. sposób połączenia,częstotliwość nośna, napięcie polaryzacji, moment dokręcenia śrub itp.).

Oczywiście, dla każdej cechy należy podać przedział dopuszczalnych wartości (np. wartość nominalnę i dopuszczalne odchyłki).

Dokumentacja konstrukcyjna jest zapisem informacji o cechach konstrukcyjnych.

Zmienne decyzyjne są minimalnym zbiorem wielkości, służącym do jednoznacznego określenia wariantu "a" w zbiorze danych wariantów A w danym zadaniu wyboru. Są to wybrane cechy konstrukcyjne albo ich funkcje,np.zagregowane cechy konstrukcyjne (np. pole powierzchni zamiast wymiarów figury pola przekroju pręta) albo np. numer wariantu, gdy zbiór A jest zbiorem skończonym.

Liczność zbioru zmiennych decyzyjnych P powinna być tym większa, im większa jest wymagana dokładność rezultatów wyboru. Wzrost liczby P powoduje szybki wzrost trudności obliczeniowych.

W tej pracy zbiór X będzie minimalnym zbiorem cech konstrukcyjnych, pozwalających jednoznacznie zidentyfikować wariant rozwiązania $a \in A = \left[x_1,\ldots,x_p\right]$, gdzie $\left\{x_p : p = \overline{1,P}\right\}$ jest zbiorem wartości cech X_p.

Właściwości konstrukcyjne Y

$$Y = \left\{Y_r : r = \overline{1,R}\right\} \tag{3.2}$$

(osięgi obiektu) są zbiorem wielkości, których wartości stanowią zbiór informacji konieczny do racjonalnego użytkowania obiektu, a także jego przechowywania, transportu, instalowania, sprawdzania i kasacji.

Są to parametry ilościowe charakteryzujące relacje obiektu do jego otoczenia: techniczne, ekonomiczne, ergonomiczne i inne, np.dla domowego odbiornika radiowego będą to gabaryty, ciężar, moc wyjściowa, liczba zakresów, zniekształcenia sygnału, niezawodność, bezpieczeństwo, cena, estetyka, możliwość współpracy z innymi urządzeniami itd.

Zauważmy, że niektóre wielkości są cechami konstrukcyjnymi obiektu i jednocześnie właściwościami konstrukcyjnymi jego części składowych (np. moc zasilacza odbiornika radiowego, prędkość znamionowa silnika napędowego maszyny itp.).

Często operuje się właściwościami zagregowanymi (syntetycznymi),np.moc z 1 kg masy silnika albo zużycia energii na 1 kg wyprodukowanego medium.

W tej pracy Y jest minimalnym zbiorem właściwości konstrukcyjnych,na które nałożono wymaganie równościowe i nierównościowe, służące do jednoznacznego formalnego opisu wymagań S (patrz p. 3.4).

Kryteria oceny

$$K = \left\{K_i : i = \overline{1,I}\right\} \tag{3.3}$$

są to wielkości wzięte spośród właściwości Y, które są brane pod uwagę w danym zadaniu wyboru do określenia jakości obiektu z punktu widzenia przyjętego systemu wartości W (patrz p. 4.2).

Projektant operuje zatem tylko na dwóch zbiorach zmiennych: cech konstrukcyjnych X i właściwości konstrukcyjnych Y. Są to najczęściej zmienne fizyczne, ekonomiczne (np. koszt, czas wykonania, nakłady) lub psychologiczne (np. estetyka, poczucie zagrożenia).

Wielkości te mogą być jednostkowe, np. siła lub złożone (zagregowane), tzn. sztucznie utworzone z jednostkowych, np. sprawność czy wydajność.

Ze względu na sposób ujęcia ilościowego tych zmiennych wyróżniamy wielkości deterministyczne i losowe (probabilistyczne). Ze względu na jednoznaczność (dokładność) zdefiniowania i dokładność ujęcia ilościowego możemy mówić o wielkościach zwykłych (zdefiniowanych,mierzalnych."ostrych") i rozmytych [8].

Wielkość rozmyta to taka, która nie jest zdefiniowana lub nie jest mierzalna. W tym przypadku należy starać się znaleźć odpowiedni zbiór wielkości zastępczych ostrych, tak jak np. stało się to w ostatnim okresie z pojęciem bezpieczeństwa konstrukcji.

Osobno należy przedyskutować losowość i nieetecjonarność zadania wyboru. W istocie zarówno potrzeba, jak i rozwiązania mają charakter probabilistyczny, gdyż procesy projektowania, wytwarzania, użytkowania i eksploatacji mają charakter stochastyczny. Zatem określone rozwiązanie $a \in A$ powinno być opisane zmiennymi (cechami X_p i właściwościami Y_r) losowymi, gdyż proces wytwarzania powoduje pewien rozrzut tych wielkości dla serii wytworów zrealizowanych według tej samej konstrukcji. Ale nawet dla jednego określonego i fizycznie wykonanego wytworu, którego cechy konstrukcyjne są deterministyczne, losowe są właściwości, gdyż zależą one od zakłóceń na wejściach, które z reguły są losowe.

Właściwości i cechy konstrukcyjne są także funkcjami czasu, co spowodowane jest procesami zużycia, zmęczenia materiałów, starzenia itp. Losowa jest także potrzeba, opisana wymaganiami konstrukcyjnymi Ω, ponieważ losowy jest także użytkownik, a nawet dla określonego użytkownika potrzeba jest losowa, gdyż losowe są warunki użytkowania. Także proces wytwarzania wprowadza losowość do opisu wymagań konstrukcyjnych w części dotyczącej ograniczeń na cechy konstrukcyjne x_p i niektóre właściwości konstrukcyjne y_p. Potrzeba jest też zmienna w czasie, gdyż wszystkie zjawiska są dynamiczne.

Najczęściej nie jesteśmy w stanie ustalić rozkładów prawdopodobieństwa tych wielkości. Robimy to tylko dla najważniejszych zmiennych i w przypadku kosztownych wytworów i ich seryjnej produkcji. Uproszczone przedstawienie polega na dyskretyzacji losowego rozkładu ciągłego, przyjęciu rozkładów standardowych lub określeniu reprezentacji deterministycznej.

Dyskretyzacja prowadzi do wyróżnienia pewnych przedziałów, które, za teorią decyzji (np. [46]) można nazwać stanami natury $\{s_j : j = \overline{1,n}\}$ i przypisać im odpowiednie prawdopodobieństwa $p_j(s_j)$, przy czym powinny one być komplementarne ($\sum_{j=1}^{n} p_j = 1$) i niezależne statystycznie $P(s_j|s_i) = 0$, $j,i = \overline{1,n}$, $j \neq i$.

Standaryzacja prowadzi do zastosowania uniwersalnych rozkładów prawdopodobieństwa (np. Gaussa lub rozkładu równomiernego - patrz także kryterium Laplace'a [46], [58]), ułatwiając w ten sposób etap oceny (rozdz. 4).

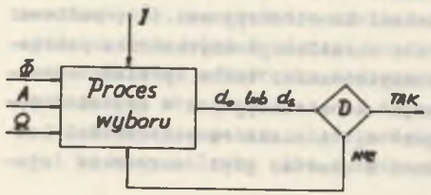
W najprostszych przypadkach szukamy reprezentacji deterministycznej, podając kres górny lub dolny przedziału zmienności danej zmiennej lub obydwa kresy lub średnią przedziału, czasem jako wielkość rozmytą (np. "dokładność winna wynosić około 1%" lub: "obiekt winien odznaczać się wielką wygodą obsługi").

3.4. Sformułowanie zadania wyboru

Analizując strukturę procesu projektowania, przedstawioną na schematach poprzedniego rozdziału, można dostrzec, że jednym z typowych, wielokrotnie powtarzających się działań jest proces wyboru, który powinien poprzedzać każdą racjonalną decyzję. Wybór jest procesem gromadzenia i przetwarzania informacji i jego celem jest wskazanie jednego elementu d_o ze zbioru wariantów A, takiego, który spełnia wszystkie wymagania Ω i jest najlepszy ze względu na pewne kryterium wyboru ϕ :

$$d_o = \left\{ a_o \in A : \Omega(a_o) \geq 0 \wedge \phi(a_o) = \sup_{a \in A} \phi(a) \right\}, \qquad (3.4)$$

gdzie $\Omega \geq 0$ oznacza, że wszystkie wymagania są spełnione.



Rys. 3.2. Jednostopowy proces wyboru w projektowaniu jako proces przetwarzania informacji

ϕ - nadrzędne kryterium wyboru, A - zbiór wariantów, Ω - zbiór wymagań, d_o - wariant optymalny, d_s - wariant satysfakcjonujący, I - dodatkowa informacja, zbierana w trakcie procesu wyboru, D - decyzja

Zadanie wyboru może być jednoznacznie sformułowane za pomocą trójki: $\langle A, \Omega, \phi \rangle$. Należy jednak pamiętać, że ze względu na niekompletność i niejednoznaczność informacji (o elementach tej trójki), z jaką ma się do czynienia w rzeczywistych procesach projektowania, należy zapewnić podmiotowi procesu wyboru możliwość uzyskania dodatkowych informacji I w czasie realizacji procesu wyboru (rys. 3.2).

3.4.1. Zbiór wariantów projektowych A

Zbiór elementów $A = \{a\}$ jest zbiorem możliwości (wariantów). W procesie projektowania mogą nimi być:

- możliwe (wcześniej wygenerowane) sposoby rozwiązania zadania projektowego lub jego części,
- możliwe zbiory wymagań projektowych (gdy określamy te wymagania, patrz np. [81]),
- możliwe sposoby postępowania w procesie projektowania (np. metody poszukiwania rozwiązań)

lub zbiór innych możliwości, przed którymi stoi decydent.

W dalszym ciągu zbiór A nazywać będziemy zbiorem wariantów lub (zamiennie) zbiorem rozwiązań. Zakładamy także, że wszystkie warianty są wewnętrznie spójne, tzn. nie są błędne w tym sensie, że nie gwałcą praw przyrody i nie są oparte na błędnych przesłankach logicznych.

Poszczególne warianty $a_v \in A$, czyli każda wersja rozwiązania zadania projektowego może być przedstawiona jako wektor cech konstrukcyjnych w P-wymiarowej przestrzeni cech X:

$$a_v^x = x = [x_{1v}, \ldots, x_{pv}, \ldots, x_{Pv}]. \qquad (3.5)$$

gdzie przestrzeń cech konstrukcyjnych jest zdefiniowana jako iloczyn kartezjański zbiorów wartości x_p poszczególnych cech X_p

$$X = X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_P \qquad (3.6)$$

Wektor a_v^x nazywany jest też konstrukcją obiektu, a przestrzeń X bywa nazywana przestrzenią zmiennych decyzyjnych.

Ze względu na obecność wymagań (ograniczeń) Ω zbiór A jest zawsze zbiorem ograniczonym (patrz p. 3.6, selekcja).

Ponieważ cechy konstrukcyjne X_p mogą być wielkościami ciągłymi lub dyskretnymi, zbiór A może być odpowiednio zbiorem ograniczonym o mocy continuum ("ciągłym") lub zbiorem skończonym ("dyskretnym"). Często (np. ze względu na konieczność obliczeń numerycznych) dokonywana jest sztuczna dyskretyzacja zbioru ciągłego w zbiór skończony o mocy V_o:

$$A = \{a\} \rightarrow \{a_v : v = \overline{1,V_o}\} \qquad (3.7)$$

Każda wereja a_v może być również przedstawiona jako wektor właściwości w R-wymiarowej przestrzeni właściwości:

$$a_v^Y = y = [y_{1v},\ldots,y_{rv},\ldots,y_{Rv}], \tag{3.8}$$

gdzie przestrzeń właściwości jest zdefiniowana jako iloczyn kartezjański zbiorów wartości y_r poszczególnych właściwości Y_r:

$$Y = y_1 \times y_2 \times \ldots \times y_r \times \ldots \times y_R \tag{3.9}$$

Często zbiór wariantów A podawany jest nieformalnie, tzn. elementy zbioru charakteryzowane są słownie, za pomocą zmiennych lingwistycznych (np.: a_1 - obudowa blaszana tłoczona, a_2 - blaszana zgrzewana, a_3 - odlewana itd.). Wówczas należy wprowadzić nowe zdefiniowane zmienne $X_1,\ldots,X_p$, np. numer kolejny wariantu.

3.4.2. Wymagania projektowe Ω

Wymaganiami projektowymi (lub konstrukcyjnymi) lub krótko - wymaganiami - nazwiemy wszystkie ograniczenia narzucone na wartości zmiennych projektowych.

Na początku dane są one (a przynajmniej ich część) w postaci opisowej lub niezdefiniowanej (np.: "obiekt ma być odporny na drgania przemysłowe"), a czasem nawet niejawnej (np.: "obiekt ma być przystosowany do różnych warunków klimatycznych"). Wymagania dane w tej formie oznaczymy symbolem Ω. Formalizacja zadania wyboru stwarza konieczność formalnego i jednoznacznego zapisu wymagań, których zbiór jest elementem zadania wyboru. Przedstawimy je zatem jako zbiór równań i nierówności i w tej nowej postaci oznaczymy symbolem S.

Wymagania mogą być nałożone na wartości poszczególnych zmiennych (cech konstrukcyjnych x_p lub właściwości konstrukcyjnych y_r) albo na ich funkcje. Mogą one być nierównościowe lub równościowe:

$$S = \left\{ \begin{array}{lll} a_p \leq x_p \leq b_p & p = \overline{1,P} & (a) \\ a_r \leq y_r \leq b_r & r = \overline{1,R} & (b) \\ x_p = u_p & & (c) \\ y_r = u_r & & (d) \\ a_m \leq g_m = g_m(x_p,y_r) \leq b_m & m = \overline{1,M} & (e) \\ f_n = f_n(x_p,y_r) = u_n & n = \overline{1,N} & (f) \end{array} \right\} \tag{3.10}$$

gdzie a_i, b_i, u_i są stałymi ($i = p,r,m,n$).

Do zbioru zmiennych $X = \{x_p\}$ i $Y = \{y_r\}$ włącza się tylko te zmienne, które są istotne w danym zadaniu wyboru. Oznacza to, że do zbioru cech konstrukcyjnych włącza się te, które utworzą minimalny zbiór zmiennych decyzyjnych i wystarczą do jednoznacznego scharakteryzowania poszczególnych wariantów $a \in A$. Włącza się też te zmienne, na których wartości x_p nałożono ograniczenia (3.10a), np. technologiczne czy materiałowe. Wyłącza się te, które dają zbyt szczegółowy opis wariantów oraz te, które nie podlegają wariantowaniu, gdyż ich wartości przyjęto jako stałe (3.10c).

Do zbioru właściwości konstrukcyjnych włącza się tylko te, na których wartości y_r nałożono ograniczenia (3.10b) i (3.10d) oraz te, które posłużą do sformalizowania systemu wartości (rozdz. 5).

Związki (3.10a) i (3.10b) oznaczają, że nałożono ograniczenia na wartości zmiennych, tzn. że ich wartości mają zawierać się w pewnych dopuszczalnych przedziałach. Przedziały te wynikają z ograniczeń fizycznych (np. technicznych), ekonomicznych, ergonomicznych itd.

Podobny charakter ma ograniczenie (3.10e), przy czym nałożono je nie na zmienne fizyczne, lecz na ich związki. Związki te często są nieliniowe. Gdy dadzą się rozwikłać, mogą być sprowadzone do postaci 3.10a lub 3.10b.

Przykład. Odporność urządzenia na zewnętrzne wymuszone drgania obudowy ma być taka, aby urządzenie to mogło pracować, gdy rzeczywiste wartości amplitudy i częstotliwości leżą w pewnym określonym normą obszarze wartości dopuszczalnych. Ten obszar od góry ograniczony jest pewną funkcją $y_1 = y_1(y_2)$, gdzie y_1 i y_2 są dopuszczalnymi wartościami amplitudy i częstotliwości, przy czym normy (ogólniejsze) określają minimalne wartości tych wielkości $(y_1)_o$ i $(y_2)_o$, np. w normie PN-74/M-42020 (POLMATIK) określono funkcję $(y_1)_o = y_{1o}(y_{2o})$ w postaci tabelarycznej, a nie w sposób ciągły. Zatem odpowiednie wymaganie projektowe zapiszemy:

$$S(y_1,y_2) = y_1 - y_{1o}(y_2) \geq 0 .$$

Uwaga. W celu uproszczenia zapisu matematycznego wymagania funkcyjne kilku zmiennych (najczęściej nieliniowe) sprowadza się do liniowych wymagań niefunkcyjnych nowo wprowadzonej jednej zmiennej. Na przykład w łożysku walcowym ślizgowym wymaga się, aby stosunek nośności łożyska (y_1) do powierzchni nośnej, określonej wymiarami panewki (np. jej długością x_1 i średnicą x_2), nie przekraczał wytrzymałości powierzchniowej panewki, zależnej od właściwości tworzywa x_3:

$$\frac{y_1}{f(x_1,x_2)} \leq p(x_3) = p_{dop}.$$

Po wprowadzaniu nowej zmiennej - umownego nacisku powierzchniowego $p = \frac{y_1}{x_1 x_2}$ - możemy wymaganie to zapisać:

$$S(y_1, x_1, x_2, x_3) = p_{dop} - p \geq 0$$

Wyznaczanie dopuszczalnych przedziałów jest odrębną sprawą, robi się to w jednym z początkowych etapów mikrostruktury (patrz rys. 2.4, etap "Ilościowe określanie zadania").

Wykorzystuje się do tego celu różne informacje (np. umowę-zlecenie, normy, przepisy) oraz różne metody, np. metodę drzewa celów Crosse [7], metodę zdarzeń i sprzężeń Tarnowskiego [67] lub metodę list kontrolnych Jonesa [28]. Wymagania określone są często przez projektanta arbitralnie. Zbiór wymagań może też być przedmiotem optymalizacji, patrz np. [81].

Niektóre związki równościowe (3.10d) mogę być ograniczeniami ostrymi, tzn, że przedział dopuszczalnych wartości jest jednoelementowy (np. żądamy, aby wzmocnienie wzmacniacza czy przełożenie przekładni miało określoną wartość). Część związków równościowych wynika stąd, że wartości niektórych współczynników przyjmuje się jako stałe, np. współczynnik tarcia.

Analogicznie jak dla wymagań nierównościowych (równ. 3.10e), niektóre wymagania równościowe nie dadzą się rozwikłać ze względu na zmienne y_r i wówczas trzeba je zapisać w postaci uwikłanej (3.10f). Wraz z równaniami (3.10c) i (3.10d) tworzę one zbiór wymagań równościowych. Na przykład żądamy, aby napięcie zasilania przyrządu czy rozstaw kół wagonu miały określoną wartość. Nie należy ich mylić ze związkami równościowymi modelu matematycznego obiektu (patrz rozdz. 3.6, komentarz do działania 3a oraz rozdział 4).

Zbiór wielkości, których wartości przyjmujemy w danym zadaniu jako stałe (równ. 3.10c i 3.10d), nazwiemy parametrami stałymi i oznaczać będziemy wektorem parametrów U.

Zmienne X_p i Y_r powinny być zdefiniowane (ostre). Wartości stałych a_i, b_i, u_i mogą być określone deterministycznie lub losowo. Mogę być dodatnie, ujemne lub zerowe. Zależności g_m i f_n powinny mieć charakter funkcji matematycznych (deterministycznych lub probabilistycznych).

Rozmyte mogę być:

- niektóre zmienne X_p lub Y_r, kiedy nie są zdefiniowane, np. "odporność na drgania" lub "wygląd zewnętrzny",
- stałe a_i, b_i, u_i, np. "obiekt nie powinien być zbyt ciężki",
- zależności g_m i f_n, np. "bezpieczeństwo obsługi winno być dostateczne".

Dokonując zatem przekształcenia danego zbioru Ω w zbiór wymagań S, należy wyeliminować elementy rozmyte i arbitralnie zastąpić je ostrymi, a zamiast zmiennych niezdefiniowanych zastosować równoważne zmienne mierzalne. W pewnych przypadkach można zastosować pojęcie wzorców, np. "dokładność działania nie powinna być gorsza niż określonego (znanego) przyrządu".

Ograniczenia (3.10a) mogę być włączone do ograniczeń (3.10b), jeśli zauważymy, że g_m mogę być uznane za zmienne i przyjęte jako dodatkowe właściwości konstrukcyjne Y_r, $r = 1,\ldots,R, R+1,\ldots,R+M$.

Zatem wymagania (3.10), po ich sformalizowaniu i uporządkowaniu, można zapisać jako:

$$S = \left\{ f_i(x_1,\ldots,x_p, y_1,\ldots,y_R) = 0 : i = \overline{1,I} \right\} \wedge \wedge \left\{ g_j(x_1,\ldots,x_p, y_1,\ldots,y_R) \geq 0 : j = \overline{1,J} \right\} \quad (3.11)$$

lub w postaci standardowej:

$$S = \left\{ \begin{array}{ll} a_p \leq x_p \leq b_p & (a) \\ a_r \leq y_r \leq b_r & (b) \\ f_n(x_p, y_r) = u_n & (c) \end{array} \right\} \quad (3.12)$$

Po uwzględnieniu związków równościowych, tzn. modelu matematycznego obiektu (równania (3.22) lub (3.23)), ograniczenia S możemy zapisać w przestrzeni decyzyjnej X jako:

$$S^X = \left\{ f_m(x_1,\ldots,x_p) = 0 : m = \overline{1,M} \right\} \wedge \left\{ g_n(x_1,\ldots,x_p) \geq 0 : n = \overline{1,N} \right\} \quad (3.13)$$

lub w przestrzeni osiągów Y

$$S^Y = \left\{ f_k(y_1,\ldots,y_R) = 0 : k = \overline{1,K} \right\} \wedge \left\{ g_l(y_1,\ldots,y_R) \geq 0 : l = \overline{1,L} \right\} \quad (3.14)$$

Związki typu (3.12c) staramy się rozwikłać ze względu na y_r:

$$y_r = y_r(x_p) + c_r, \quad (3.15)$$

gdzie:

c_r - stała

(na ogół jest to możliwe nie dla wszystkich y_r).

Po rozwikłaniu, wymagania (3.12) można zapisać następująco:

$$S = \left\{ \begin{array}{ll} a'_p \leqslant x_p \leqslant b'_p & (a) \\ f_k(x_p) = u_k & (b) \end{array} \right\} \qquad (3.16)$$

a'_p, b'_p - nowe stałe.

Zbiór równań (3.16a) zastępuje zbiory (3.12c) i (3.15). Jest to jawna postać wymagań, czytelna dla projektanta.

Po wprowadzeniu nowych zmiennych, tzw. bilansowych x_l, związki (3.16a) można zamienić na warunki nieujemności i wówczas otrzymujemy standardową postać wymagań:

$$S = \left\{ \begin{array}{l} f_j(x_1,\ldots,x_l,\ldots,x_L) = c_j \;:\; j = \overline{1,J} \\ x_l \geqslant 0 \;:\; l = \overline{1,L} \end{array} \right\} \qquad (3.17)$$

Dla przypadku liniowego:

$$S = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{l=1}^{L} d_{jl} x_l = c_j \\ x_l \geqslant 0 \end{array} \right. \qquad (3.18)$$

Charakterystyka kryterium wyboru ϕ będzie omówione w rozdz. 5.Tu ograniczymy się do stwierdzenia, że podana projektantowi na początku informacja o kryterium wyboru jest albo niejednoznaczna i często sprzeczna wewnętrznie (np. "wytwór ma być tani i na wysokim poziomie technicznym") albo arbitralna i budząca wątpliwości co do adekwatności (np. "wytwór ma być optymalny ze względu na ciężar", czyli najlżejszy).

3.4.3. Zadanie satysfakcji [42], [73]

W praktyce częstym przypadkiem jest, że ze względu na istniejące ograniczenia na sam proces projektowania wykonawca nie może szukać optimum bezwzględnego (globalnego), tzn. nie może szukać dokładnego rozwiązania zadania optymalizacji. Szuka wówczas rozwiązania satysfakcjonującego d_s takiego, że:

$$d_s = \left\{ a_v \;:\; S(a_v) \geqslant 0 \wedge F(a_v) \geqslant F_{min} \right\} \qquad (3.19)$$

albo:

$$d_s = \left\{ a_v \;:\; S(a_v) \geqslant 0 \wedge \bigwedge_{i \in [1,I]} k_i(a_v) \geqslant k_{i\,min} \right\}. \qquad (3.20)$$

gdzie:

- F - jest funkcją celu,
- $k_i(a_v)$ - wartościami kryteriów oceny,
- F_{min} i $k_{i\,min}$ - minimalnymi wartościami satysfakcjonującymi, a znak $\geqslant$ oznacza nie gorsze niż.

W konkretnym przypadku może istnieć dowolnie wiele takich rozwiązań d_s (zależnie od wartości F_{min} lub $k_{i\,min}$). Jako rozwiązanie zadania satysfakcji przyjmujemy dowolne, np. pierwsze znalezione.

3.4.4. Wymagania i ograniczenia dotyczące procesu wyboru

W procesie wyboru występuje szereg uwarunkowań (i ograniczeń); wymieńmy najbardziej typowe:

- ograniczona (niepełna i nieprecyzyjna) informacja wejściowa, o czym wspomniano powyżej,
- ograniczone środki na realizację procesu wyboru (czas, pieniądze, dostęp do informacji, dostęp do ekspertów itd.),
- ograniczone kwalifikacje podmiotu procesu wyboru,
- konieczność znalezienia racjonalnego kompromisu (między sprzecznymi wymaganiami stawianymi wybieranym obiektom).

Jednocześnie stawiamy szereg wymagań samemu procesowi wyboru (i jego rezultatom), który powinien być między innymi:

- adekwatny do określonej sytuacji (tzn. do rodzaju zadania i możliwości systemu projektującego),
- jednoznaczny, powtarzalny (stabilny),
- możliwy do przeprowadzenia przez przeciętnego projektanta przy danej informacji,
- przekonywający dla decydenta, nie zawsze będącego specjalistą,
- jawny, tzn. możliwy do prześledzenia i odtworzenia "krok po kroku".

W dalszym ciągu tej pracy będziemy starali się doprowadzić powyżej sformułowane zadanie wyboru do innej, sformalizowanej postaci, znanej jako zadanie optymalizacji; należy maksymalizować pewien funkcjonał:

$$F = F(k_1,\ldots,k_I)$$

w obecności ograniczeń równościowych:

$$\left\{f_m(x_1,\ldots,x_P) = 0 : m = \overline{1,M}\right\} \qquad (3.21)$$

oraz nierównościowych:

$$\left\{g_n(x_1,\ldots,x_P) \geq 0 : n = \overline{1,N}\right\}$$

gdzie $k_i = k_i(x_1,\ldots,x_P) : i = \overline{1,I}$.

Zatem przez wybór rozumiemy tu proces obejmujący sformułowanie zadania optymalizacji i rozwiązanie tego zadania po to, by podjąć decyzję akceptującą rozwiązanie tego zadania d_o lub d_s, przy początkowej informacji dotyczącej ϕ, Ω, A (rys. 3.2).

3.5. Przegląd spotykanych ujęć zadania wyboru

Wybór i związana z nim decyzja występują niemal we wszystkich rodzajach świadomej działalności człowieka: w nauce, technice, sztuce, organizacji przedsięwzięć, sporcie, medycynie, w taktyce wojennej, w zabawie, grach itd. Dały one inspirację odpowiednim teoriom i metodom, przy czym niektóre z nich mają znaczenie interdyscyplinarne, np. teoria decyzji, teoria gier, optymalizacja, teoria wartości, metrologia, ekonometria, psychologiczna teoria decyzji, kwalimetria i inne. W związku z tym prace dotyczące wyboru spotyka się w różnych działach. Ostatnio jednak pojawiły się opracowania monograficzne, głównie związane z badaniami operacyjnymi (Operational Research) i naukę o zarządzaniu (Management Science), a także naukę o projektowaniu (Engineering Design) i teorię jakości (Quality Theory).

Spotykane strategie postępowania w zadaniu wyboru można podzielić na dwie główne grupy:

1. Wybór wielokryterialny: tworzy się I-wymiarową metryczną przestrzeń kryteriów (przestrzeń celów) $K_1, K_2, \ldots, K_I$. Każdy jej punkt odpowiada jednemu wariantowi, na każdej współrzędnej można wyróżnić kierunek lepszych i gorszych wariantów oraz przypisać im pewną miarę wartości ze względu na to kryterium. Aby wybrać wariant najlepszy, należy porównać wszystkie warianty wg jednego kryterium K_i a potem "złożyć" I wyników. Problemem jest sposób agregacji, istnieje też wiele propozycji. Ustalone kryterium wyboru jest metryką przestrzeni celów.

2. Wybór parami: zakłada się, że dla każdej pary wariantów można wskazać lepszy albo stwierdzić że obydwa są równocenne, albo że są nierozróżnialne, przy czym ten elementarny wybór nie zależy od pozostałych wariantów, czyli nie zależy od kontekstu całego zadania. Można zbudować odpowiedni graf preferencji.

Wydaje się, że w projektowaniu technicznym, gdzie na jakość wariantu składa się wiele aspektów (kryteriów oceny) i gdzie wymaga się dużego stopnia obiektywizacji wyboru oraz ujawniania i udokumentowania procesu wyboru i decyzji, ujęcie 2 ma następujące wady w porównaniu z ujęciem 1:

1) oceniający nie zna pełnego kontekstu: ma tylko dwa warianty a nie cały ich zbiór;

2) jeśli liczba aspektów $I > 7$, oceniający nie jest w stanie racjonalnie jednocześnie ich uwzględnić [36, s. 56];

3) w warunkach wielokrotnie powtarzanego procesu wartościowania i wyboru trudno spełnić wymagania przechodniości preferencji oceny [36, w. 137];

4) trudno zachować stabilność oceny w czasie całego procesu;

5) trudno algorytmizować wybór, szczególnie gdy dysperaja zbioru wariantów A (patrz p. 3.7.1b) jest duża.

Jednak ujęcie 2, oparte na porównywaniu alternatyw w parach, jest często stosowane w praktyce, szczególnie przy bardziej intuicyjnym a mniej algorytmicznym wyborze, np. w przypadkach rozwiązań oryginalnych, wynalazczych lub artystycznych. Ujęcie to doczekało się formalizacji, np. w monografii [27] przytoczono trzy metody, przy czym od eksperta oczekuje się, że będzie on w stanie wybrać jedną spośród dwóch alternatyw jako lepszą lub określić ich uporządkowanie. Wybór parami staje się koniecznością, gdy nie można explicite ustalić zbioru kryteriów oceny K.

W tej pracy zajmiemy się wyłącznie wyborem kryterialnym, przy czym liczba kryteriów może być dowolna. Znane ujęcia można zaliczyć do dwóch następujących grup.

Grupa A. A priori przyjmuje się pewne pojęcie, definiuje się i je przyjmuje jako kryterium optymalizacji, sprowadzając problem do zadania optymalizacji z jedną funkcją (lub funkcjonałem) celu. Odpowiednie metody bywają nazywane metodami preferencyjnymi [6].

Grupa B. Ustala się zbiór kryteriów K i szuka się wariantu kompromisowego ze względu na wszystkie kryteria. Odpowiednie metody bywają nazywane metodami generacyjnymi [6] lub metodami polioptymalizacji.

W monografii [27] znane metody usystematyzowano w 5 grupach, zależnie od tego, jakich informacji o preferencjach może udzielić ekspert (czy podejmujący decyzję):

1) brak informacji,

2) informacja o dopuszczalnych wartościach progowych kolejnych kryteriów,

3) uporządkowanie kryteriów wg ważności,

4) informacje o wartościach współczynników wagi,

5) wypowiedzi o wartościach wzajemnych substytucji między kryteriami.

W metodach grupy A jako kryterium optymalizacji przyjmuje się jedną spośród różnych wielkości fizycznych lub ekonomicznych albo tworzy się z nich kryterium złożone. Może to być np. całkowity koszt społeczny wytwarzania i użytkowania danego obiektu [63] [65] albo tzw. niezawodność społeczna [12], albo efektywność nakładów zaproponowana przez Wasiutyńskiego [86], albo zysk całkowity przedsiębiorstwa itp. Są to więc najczęściej wielkości ekonomiczne. W pewnych szczególnych przypadkach można uznać za racjonalne (właśnie ze względu na kryteria społeczne) pewne kryteria techniczne, np. niezawodność lub ciężar (patrz p. 5.3 i 5.4).

W latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych popularne było szukanie pewnych, możliwie uniwersalnych formuł na zastępcze skalarne kryterium optymalizacji F, którego argumentami są naturalne kryteria oceny $K = K_1, \ldots, K_I$, przy czym szukana $F(K_1, \ldots, K_I)$ nie musi mieć interpretacji fizycznej ani ekonomicznej. Do zbioru kryteriów K włącza się kryteria techniczne, ekonomiczne, ergonomiczne, estetyczne i inne. Przykładami takich kryteriów są propozycje Kolmana [34] (metoda uśrednionych znamion jakości), Tomaszewskiego [83, s. 291] (iloczynowa globalna miara jakości), Czechowskiego [83, s. 290] Oyrzanowskiego [51] i inne, przytoczone np. w pracach: [4], [5, rozdz. V], [6], [27], [35], [47], [60].

Do tej samej grupy należy metoda autora [74], omówiona w p. 5 tej pracy.

Na ogół w literaturze panuje zgodność, że jakość jest wielkością wektorową [4], [32] i że każda jej miara skalarna jest sztuczna i zaciera istotne informacje. To zastrzeżenie przyczyniło się do rozwoju metod grupy B. W metodach tej grupy na początku ustala się zbiór kryteriów K i szuka się według nich zbioru rozwiązań efektywnych (polioptymalnych, patrz p. 6.1). Następnie wykorzystując eksperta (najchętniej w trybie konwersacyjnym), definiując progresywnie preferencje decydenta szuka się rozwiązania kompromisowego. W ten sposób umożliwia się decydentowi dynamiczne formułowanie systemu wartości, zależnie od konkretnie istniejącego zbioru możliwych rozwiązań (wariantów) oraz intuicyjne wykorzystanie nieformalnego układu życzeń i preferencji. Przegląd metod tej grupy można znaleźć w opracowaniach monograficznych, np. w [27], [60], [35], [53], [87], [88], [97].

Informacje dotyczące wykorzystania niektórych metod wyboru w projektowaniu technicznym można znaleźć w wielu pracach dotyczących teorii i metodyki procesu projektowania, np. w [23], [25], [50], [59], [66].

3.6. Struktura jednoetapowego procesu wyboru

Wybór jest złożonym procesem, często kosztownym i długotrwałym. Składa się z szeregu prostszych działań, które wyróżniamy po to, aby zaproponować metodykę postępowania, czyli zbiór metod odpowiednio uporządkowanych wraz ze wskazaniem kolejności stosowania i zakresu ważności.

Sposób postępowania w ogólnym przypadku powinien zależeć od rodzaju zadania wyboru (p. 3.7.1) oraz od sytuacji, w jakiej ten proces ma być realizowany (p. 3.7.2).

Mówimy tu o procesie jednoetapowym, tzn. takim, w którym podejmuje się tylko raz decyzję co do wyboru wariantu i jest to decyzja końcowa. Przeciwny przypadek pokazano w p. 4.4.2.

W pracy [73] pokazano ogólną strukturę tego procesu. Okazuje się jednak wygodne i korzystne dla jasności przedstawienia wyróżnienie dwóch klas zadań:

1) ze zbiorem wariantów o mocy continuum (ciągłym) lub ze zbiorem skończonym lecz o dużej mocy,

2) z małolicznym skończonym zbiorem wariantów.

Struktury te pokazano na rysunkach 3.3 i 3.4.

Składają się one z następujących prostszych działań:

Działanie 1. Zestawianie listy zmiennych:

- niezależnych $X = \{x_p : p = \overline{1,P}\}$ (decyzyjnych, sterujących), mierzalnych. Jest to minimalny zbiór cech konstrukcyjnych (por. p. 3.3), wystarczający do jednoznacznej identyfikacji wariantu d w danym zbiorze wariantów D oraz tych cech, na które nałożono wymagania Ω. W przypadku gdy przedmiotem wyboru (optymalizacji) jest proces, są to zmienne sterujące;
- zależnych $Y = \{Y_r : r = \overline{1,R}\}$ (właściwości, por. p. 3.3, osiągów, celów). Są to wielkości mierzalne. Do zbioru Y należą te zmienne zależne, na które nałożono wymagania i te, które są argumentami kryterium nadrzędnego Φ (rozdz. 5.4);
- parametrów stałych $U = \{u_s\}$, tj. wielkości, których wartości uznamy w danym zadaniu za stałe (patrz także równanie 3.10c i d).

Działanie 2. Zestawianie listy kryteriów oceny $K = \{K_i : i = \overline{1,I}\}$. Kryteria te są podzbiorem zbioru właściwości $K \subset Y$. Omówione ja szczegółowo w rozdz. 4, a zwłaszcza w p. 4.2.

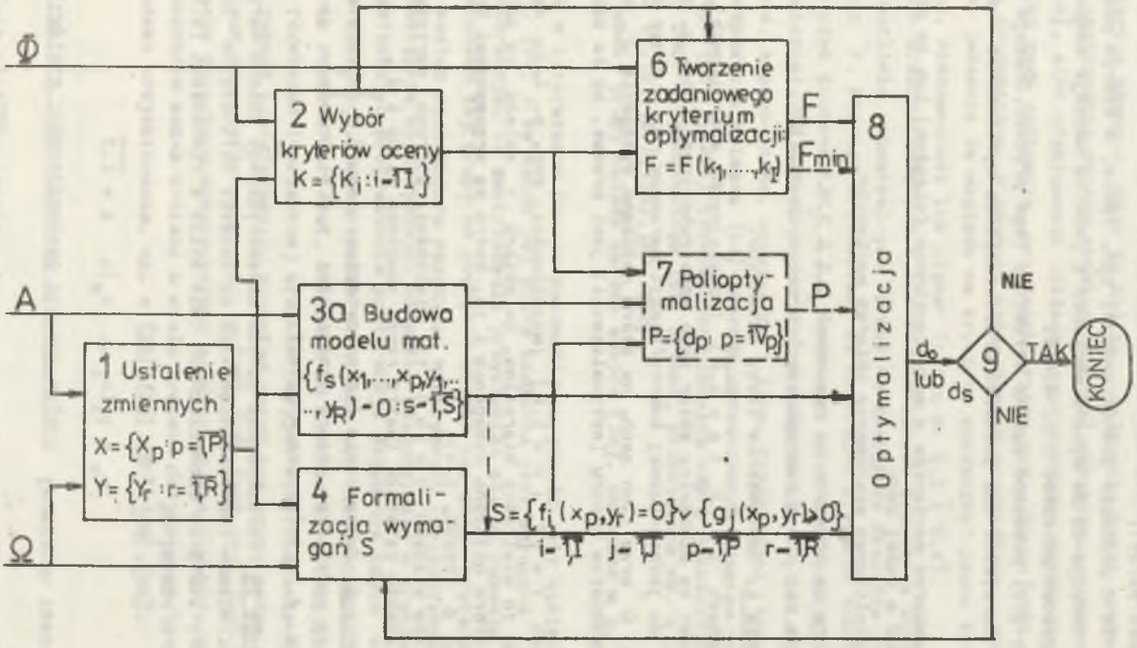
Działanie 3a. Formułowanie modelu matematycznego zbioru wariantów w postaci tzw. więzów równościowych - są to związki definicyjne oraz zapisy praw natury lub praw ekonomicznych (nie mylić z równaniami (3.10f)). Dalsze uwagi w rozdz. 4.

$$y_z = y_z(x_1, \ldots, x_p); \quad z = \overline{1,Z} \tag{3.22}$$

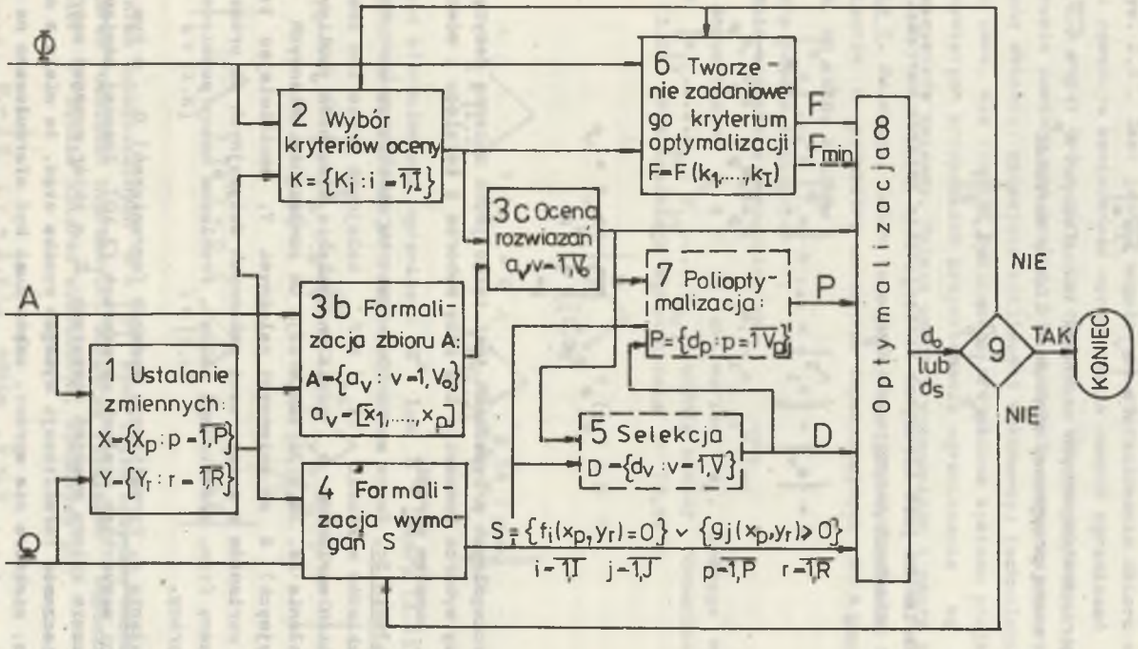
lub w postaci uwikłanej

$$f_s(x_1, \ldots, x_p, y_1, \ldots, y_R) = 0 \quad s = \overline{1,S}, \tag{3.23}$$

przy czym $Z \leq S \leq R$.



Rys. 3.3. Struktura procesu wyboru dla "ciągłego" zbioru wariantów A (objaśnienia w tekście)



Rys. 3.4. Struktura procesu wyboru dla skończonego zbioru wariantów A (objaśnienia w tekście)

Działanie 3b. Formalizacja opisu skończonego ("dyskretnego") zbioru wariantów

$$A = \left\{ a_v \; : \; v = \overline{1,V_o} \right\} \tag{3.24}$$

w kategoriach dyskretnych zmiennych niezależnych $X_p \; : \; p = \overline{1,P}$. Każda zmienna X_p można przyjmować skończoną liczbę wartości

$$x_p = \left\{ x_p^n \; : \; n = \overline{1,N_p} \right\}. \tag{3.25}$$

Zbiór wariantów jest iloczynem kartezjańskim zbiorów wartości $\left\{ x_p^n \right\}$ poszczególnych zmiennych decyzyjnych X_p:

$$A = \left\{ a_v \right\} = \left\{ x_1^{n_1} \right\} \times \ldots \times \left\{ x_p^{n_p} \right\} \times \ldots \left\{ x_P^{n_P} \right\} \tag{3.26}$$

$$v=\overline{1,V_o} \quad n_1=\overline{1,N_1} \quad n_p=\overline{1,N_p} \quad n_P=\overline{1,N_P}$$

gdzie

$$V_o = \prod_{p=1}^{P} N_p \tag{3.27}$$

W szczególnych przypadkach jest tylko jedna zmienna decyzyjna ($P = 1$), np. przy wyborze koncepcji lub przy wyborze z katalogu i wówczas x może być np. numerem wersji.

Działanie 3c. Ocena wariantów - jest to określenie wartości $k_i(a_v) \equiv k_{iv}$ lub rozkładów wartości $f(k_{iv}) \equiv f_{iv}$ kolejnych kryteriów oceny K_i dla wszystkich wariantów a_v, czyli znalezienie elementów tablicy $I \times V_o$.

Działania 3a, 3b i 3c zmierzają do powiązania zmiennych niezależnych (decyzyjnych) X ze zmiennymi zależnymi Y, umożliwiając transformację zbioru wariantów z przestrzeni zmiennych decyzyjnych do przestrzeni kryteriów oceny (tzw. przestrzeni celów). Problemom oceny poświęcony jest rozdz. 4 tej pracy.

Działanie 4. Formalizacja wymagań (ograniczeń) Ω, w tym określanie wartości wszystkich stałych we wzorach (3.10). Inaczej mówiąc, jest to przeprowadzanie zbioru wymagań rozmytych Ω w zbiór wymagań ostrych S.

Konieczność formalizacji wymagań wynika stąd, że wiele z nich dane jest opisowo, niektóre nie wprost, część musi być sformułowana na nowo, a o niektórych wcześniej zapomniano przy formułowaniu zadania wyboru (w zbiorze Ω).

Zauważmy, że główna część wymagań określana jest w etapie "Ilościowe określanie zadania projektowego" mikrostruktury procesu projektowania (blok 5, rys. 2.5). Jest jednak regułą, że sformułowanie zbioru wariantów umożliwia i powoduje konieczność wprowadzenia nowych ograniczeń i wymagań, które nie mogły być z góry dostrzeżone przez projektanta.

W tej grupie powinny też znaleźć się wymagania gwarantujące realizowalność fizyczną obiektu, opisujące możliwości wykonawcy: technologiczne, materiałowe i inne, ale również możliwości projektowe systemu projektującego. W rzeczywistych przypadkach projektowania ograniczenia są nałożone na niemal wszystkie zmienne. Dalsze uwagi o wymaganiach - patrz p. 3.4.

Działanie 5. Selekcja. Celem tego działania jest wydzielenie z danego zbioru wariantów A podzbioru wariantów dopuszczalnych $D \subset A$ (poprawnych), tzn. takich, że każdy z nich:

- nie zawiera błędów logicznych,
- czyni zadość wszystkim wymaganiom S.

Wariant dopuszczalny $d_v \in D$ to taki wariant a_v, którego wszystkie współrzędne $[x_{1v},\ldots,x_{pv}; y_{1v},\ldots,y_{Rv}]$ czynią zadość równaniom modelu (3.22) lub (3.23) oraz spełniają ograniczenia S (3.11):

$$a_v = d_v \Leftrightarrow \left\{ \bigwedge_{s \in [1,S]} f_s(a_v) = 0 \; \wedge \ldots \right.$$

$$\left. \wedge \bigwedge_{i \in [1,I]} f_i(a_v) = 0 \; \wedge \bigwedge_{j \in [1,J]} g_j(a_v) \geq 0 \right\} \tag{3.28}$$

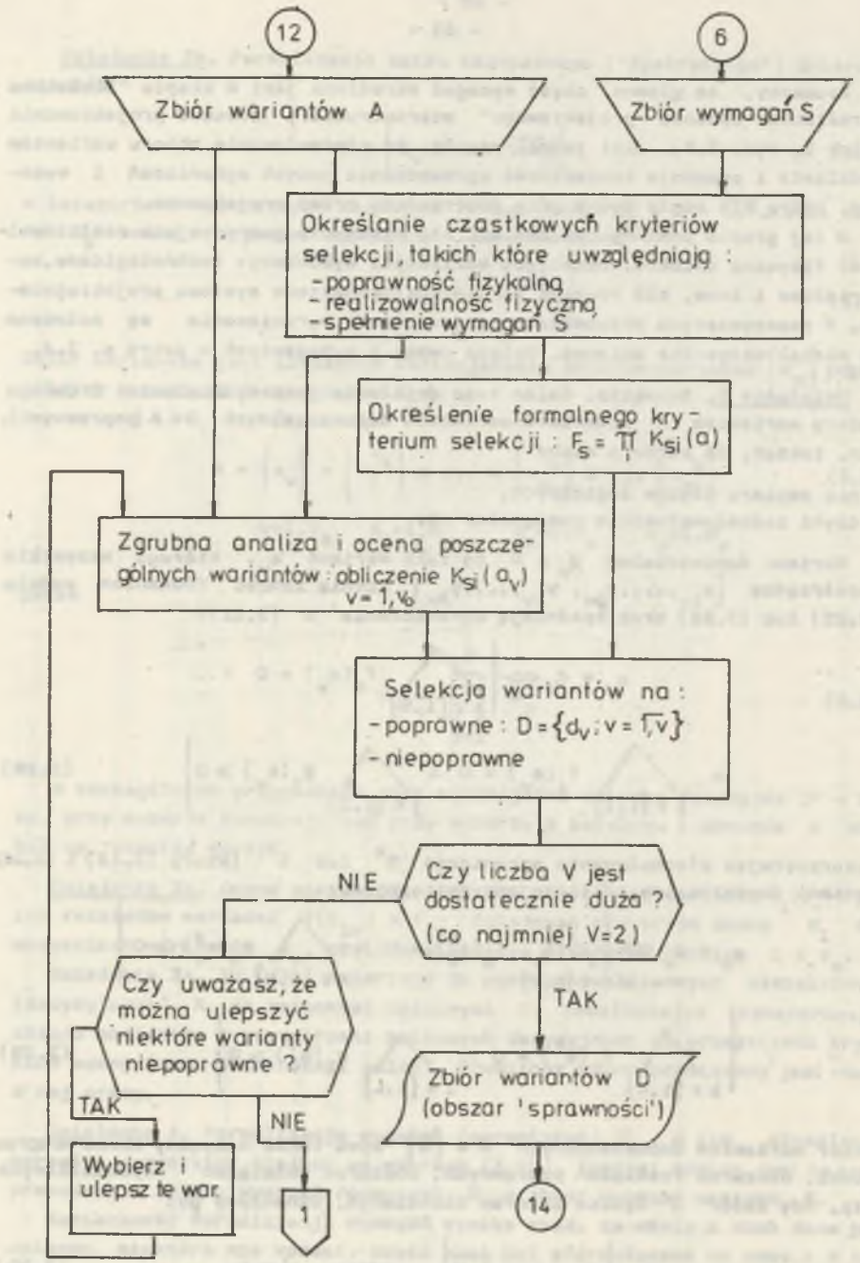
Wykorzystując sformułowania ograniczeń S^X lub S^Y (wzory (3.13) i (3.14), wariant dopuszczalny zdefiniujemy następująco:

$$a_v = d_v \Leftrightarrow \left\{ \bigwedge_{m \in [1,M]} f_m(a_v^X) = 0 \; \wedge \bigwedge_{n \in [1,N]} g_n(a_v^X) \geq 0 \right\} \vee$$

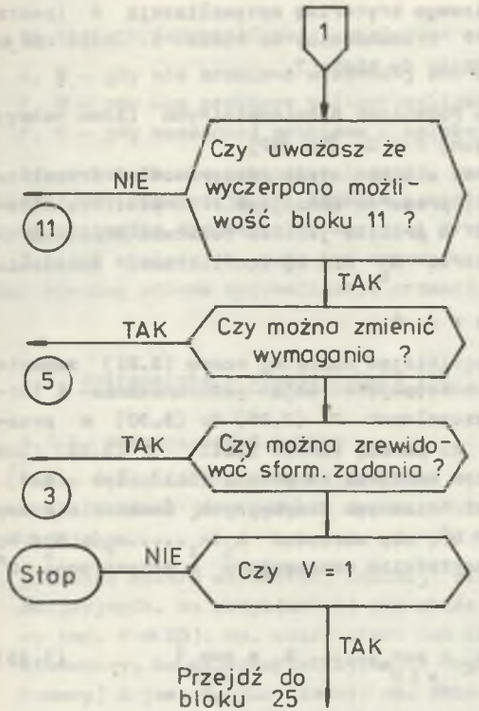
$$\vee \left\{ \bigwedge_{k \in [1,K]} f_k(a_v^Y) = 0 \; \wedge \bigwedge_{l \in [1,L]} g_l(a_v^Y) \geq 0 \right\} \tag{3.29}$$

Zbiór wariantów dopuszczalnych $D = \left\{ d \right\}$ bywa także nazywany obszarem sprawności, obszarem rozwiązań poprawnych, obszarem rozwiązań dopuszczalnych itp. Gdy zbiór D będzie zbiorem skończonym, oznaczymy go:

$$D = \left\{ d_v \; : \; v = \overline{1,V} \right\}, \quad \text{gdzie} \quad V \leq V_o \tag{3.30}$$



Rys. 3.5/1. Przykład heurystycznego algorytmu selekcji (oznaczenia wg rys. 2.5)



Rys. 3.5/2

Zgodnie z równaniami (3.5) i (3.8) wariant d może być odpowiednio przedstawiony w przestrzeni decyzyjnej X:

$$d^X = [x_1, \ldots, x_p, \ldots, x_P] \tag{3.31}$$

lub w przestrzeni celów

$$d^K = [k_1, \ldots, k_i, \ldots, k_I] \tag{3.32}$$

Przykładem procedury selekcji jest algorytm pokazany na rys. 3.5.

Selekcja nie jest działaniem koniecznym: w niektórych przypadkach obliczeniowo opłacalne jest przeprowadzanie optymalizacji (działanie 8) na pełnym zbiorze wariantów A przy jednoczesnym sprawdzaniu poprawności kolejnych wariantów. Na przykład dany jest skończony zbiór A; jeśli optymalizacja prowadzona jest metodą przeglądu, algorytm optymalizacji może przewidywać następujące kroki: generowanie rozwiązania a_v, sprawdzanie jego poprawności i (po stwierdzeniu, że $a_v = d_v$) obliczanie wartości funkcji celu $F(d_v)$, zapamiętanie jej i przejście do następnej wersji rozwiązania d_{v+1}.

Drugim zadaniem selekcji może być heurystyczne określenie pewnego podzbioru $D' \subset D \subset A$ takiego, że znalezione dla niego optimum lokalne może być zaakceptowane jako rozwiązanie zadania optymalizacji globalnego na zbiorze D, z wystarczającą małą stratą ze względu na nadrzędne kryterium optymalizacji ϕ. Takie ograniczenie, określone arbitralnie na podstawie pewnych przesłanek heurystycznych skraca proces optymalizacji i może być korzystne, gdy optymalizacja robiona jest na bardzo licznym zbiorze dyskretnym metodami numerycznymi, tzn. gdy pełny przegląd wszystkich rozwiązań jest kosztowny, a jednocześnie heurystyki stojące do dyspozycji mają dobrą wiarygodność.

Na przykład konstruktorzy silników spalinowych wiedzą, że optymalna wartość prędkości znamionowej leży w okolicy kilku tysięcy obrotów na minutę.

Działanie 6. Określania zadaniowego kryterium optymalizacji F (patrz p. 5.5). Po ustaleniu kryterium F przechodzimy do bloku 8. Jeśli nie ma możliwości ustalenia F, przechodzimy do bloku 7.

Działanie 7. Określanie zbioru rozwiązań nieulepszalnych (inna nazwy: kompromisowych, Pareto, efektywnych) $P \subset D$ [53], [97].

Nie jest to działanie konieczne, ale zmniejsza wymiarowość I przestrzeni rozwiązań przynajmniej o jeden, przez co zmniejsza trudności obliczeniowe działania 8, ułatwia "wgląd" w problem jakości (ułatwia działanie 6), a w pewnych przypadkach, gdy kryteria K_i nie są konfliktowe, działania 6 i 8 nie są potrzebne.

Dalsze uwagi w tym zakresie są w p. 6.1.

Działanie 8. Optymalizacja. Uogólniając zapis wg wzoru (3.21) zadanie optymalizacji można sformułować następująco: mając jednoznacznie i formalnie dany zbiór wariantów dopuszczalnych D (3.28) do (3.30) w przestrzeni zmiennych decyzyjnych X za pomocą równań (3.13) i (3.22) lub (3.13), (3.26) i (4.5) oraz system wartości za pomocą (5.1) lub (4.4), należy znaleźć taki zbiór wartości zmiennych decyzyjnych (wektor w przestrzeni X): $x = [x_1, x_2, \ldots, x_P] \in D^X$, aby wartości $k_i(x_1, \ldots, x_P)$, $K_i \in K$, $i = 1,I$ były możliwie bliskie wartościom supremalnym w przestrzeni D^X (wzór 3.30), co zapiszemy:

$$k_1 = \sup_{x \in D^X} !,\ k_2 = \sup_{x \in D^X} !, \ldots,\ k_I = \sup_{x \in D^X} ! \qquad (3.33)$$

Dalsze uwagi w rozdz. 6.2.

Działanie 9. Decyzja - jednorazowy akt postanowienia w sprawie rezultatów procesu wyboru (w tym optymalizacji) - podejmowana jest arbitralnie przez człowieka. Jest zawsze intuicyjna, gdyż wszystkie działania, dające się formalizować, przenoszone są do etapów wcześniejszych.

Decyzja może być tylko następująca: TAK (tzn. "zatwierdzam rezultaty poprzednich etapów, w szczególności - rozwiązanie optymalne d_o"), NIE ("nie zatwierdzam", z ewentualnym wskazaniem przyczyn i zaleceń co do tego, które działania należy poprawić), STOP ("przerwać dalsze działania projektowe"). Dalsze uwagi - p. 6.3.

Dla obu przypadków wyboru (rys. 3.3 i 3.4) działaniem niekoniecznym jest szukanie zbioru wariantów efektywnych P (działanie 7), które jednak ułatwia optymalizację, skracając obliczenia i ułatwiając ewentualny wybór intuicyjny, jeśli są trudności ze sformułowaniem zadaniowego kryterium optymalizacji F.

Dla przypadku wyboru na zbiorze skończonym (rys. 3.4) działaniem niekoniecznym jest ponadto selekcja (działania 5).

Do bloku 8 (optymalizacja) wprowadza się następujące informacje:

F, A, S - gdy nie zrobiono wcześniej ani selekcji ani optymalizacji,
F, D - gdy nie zrobiono polioptymalizacji,
F, P - gdy wcześniej zrobiono i selekcję i polioptymalizację.

Gdy wykonuje się polioptymalizację, wcześniej należy przeprowadzić selekcję. Gdy rozwiązuje się zadanie satysfakcji, należy dodatkowo zadeklarować minimalne dopuszczalne wartości kryteriów (patrz p. 3.4).

Zamiast skalara F może być wprowadzone kryterium wektorowe (3.33), lecz wówczas proces optymalizacji przestaje być jednoznaczny.

3.7. Systematyka procesów wyboru [73], [76]

3.7.1. Rodzaje zadań wyboru

Można wyróżnić wiele rodzajów zadań wyboru oraz wiele sytuacji, w których realizowane jest zadanie wyboru. Wyróżniki zadania wyboru mogą być następujące.

A. Liczność zbioru wariantów, inaczej: ciągłość lub nieciągłość zmiennych decyzyjnych. Na przykład: 1) gdy zbiór A jest dyskretny, niezbyt liczny (np. $V \leq 20$), np. zbiór ofert lub zbiór koncepcji; 2) gdy zbiór jest skończony, bo zmienne decyzyjne są dyskretne (albo może być zdyskretyzowany) i jest bardzo liczny, np. zbiór możliwych sposobów rozmieszczenia kilkunastu obrabiarek na hali, albo zbiór możliwych harmonogramów produkcji; 3) gdy zbiór A jest zbiorem ciągłym, np. zbiór możliwych średnic i długości projektowanego walczaka. Od liczności zbioru zależy między innymi metoda optymalizacji.

B. Dyspersja zbioru wariantów, mierzona szerokością przedziałów dopuszczalnych wartości zmiennych decyzyjnych, np.:

$$\delta_p = 2\,\frac{b_p - a_p}{b_p + a_p},\quad p = \overline{1,P} \qquad (3.34)$$

gdzie:

δ_p - jest rozrzutem p-tej zmiennej decyzyjnej,

a_p i b_p - dopuszczalnymi wartościami granicznymi tej zmiennej.

Im większy jest rozrzut zmiennych i im mniejsza jest liczność zbioru, tym mniejsza jest wymagana dokładność działań procesu wyboru.

C. Liczność zbioru zmiennych decyzyjnych P. Wzrost liczby zmiennych P ponad 2 ... 3 bardzo komplikuje polioptymalizację, gdyż utrudnia graficzne przedstawienie zbioru Pareto.

D. Rodzaj informacji o zbiorze wariantów, czyli charakter zmiennych decyzyjnych. Praktycznie mogą one być:

- deterministyczne ostre (nie rozmyta),
- deterministyczne rozmyte,
- losowe ostre.

Probabilistyczny opis zmiennych rozmytych nie znalazł jeszcze praktycznego wykorzystania w projektowaniu, choć istnieją próby sformalizowania [9].

E. Rodzaj modelu matematycznego zbioru wariantów, tzn. rodzaj zależności (3.23). Równania te mogą mieć postać:

- ciągłych funkcji różniczkowalnych, odwracalnych lub wykresów ciągłych (w postaci nieanalitycznej),
- niecięgłą (np. tablica),
- zależności nieodwracalnych, tzn. istnieje jednoznaczna zależność $y = f(x)$, lecz zależność $x = f^{-1}(y)$ nie jest funkcją (np. gdy x jest liczbą Reynoldsa, a y jest współczynnikiem oporu hydrodynamicznego).

Bez znaczenia jest tu sposób uzyskania poszczególnych zależności w modelu: analityczny (teoretyczny), statystyczny, symulacyjny czy inny.

F. Kompletność modelu matematycznego. Model może być pełny lub projektant jest zmuszony poszukiwać brakujących zależności analitycznie, fizykalnie (eksperymentalnie), bierze od ekspertów lub zgoła intuicyjnie szacuje sam brakujące zależności. Konieczność uzupełnienia modelu może spowodować znaczny wzrost kosztów i czasu zadania wyboru, zależnie od żądanej dokładności.

G. Rodzaj informacji początkowej o nadrzędnym kryterium optymalizacji ϕ: może być ono jednoznacznie formalnie sformułowane albo w przeciwnym skrajnym przypadku - nie ma żadnej więżącej o nim informacji. W pośrednich przypadkach może być dane w sposób rozmyty albo nie jest dane, lecz "narzuca się" (jest niedyskusyjne), albo z kontekstu zadania wynika, że powinno ono mieć charakter wieloaspektowy (kompromisowy).

H. Etapowość procesu oceny. Ocena może być jedno- lub wieloetapowa, patrz p. 4.4.

3.7.2. Rodzaje sytuacji

Wyróżnikami sytuacji, w której ma być zrealizowane dane zadanie wyboru, są następujące czynniki.

I. Stopień ważności wyboru, mierzony np. "siłą" wpływu danej decyzji na dany proces projektowania i jego końcowy rezultat. Mamy tu szeroki zakres zadań: od kluczowych, decydujących o jakości obiektu (np. decyzji makrostruktury, p. 2.4.1) do drobnych, o małym znaczeniu.

Uwaga: nie mówimy tu o stopniu ważności danego procesu projektowania, np. dla gospodarki narodowej czy inwestora.

J. Dopuszczalne nakłady czasowe i finansowe.

K. Osoba, która ma podjąć daną decyzję: czy jest to sam projektant, czy decydent zewnętrzny i czy są dobrze ustalone kryteria decyzji.

L. Dostęp do ekspertów, katalogów, wyników badań itp.

M. Dostęp do technicznych środków wspomagających, np. urządzeń i oprogramowania ETO.

Można więc wyróżnić kilkadziesiąt rodzajów zadań wyboru. Jednak typowe są następujące:

Rodzaj I. "Ciągły" zbiór rozwiązań. Niezbyt liczny zbiór zmiennych, ciągłych. Model matematyczny możliwy do wyznaczenia, analityczny. Kryterium optymalizacji zadaniowe F dane. Przykłady: 1) optymalizacja głównych wymiarów mechanizmu ze względu na prostoliniowość trajektorii albo ze względu na przeciążenie dynamiczne, 2) sterowanie ciągłym procesem produkcyjnym, np. spalaniem albo innym procesem, np. automatycznym pilotowaniem samolotu, 3) podejmowanie decyzji ekonomicznych, np. określenie dopuszczalnych kosztów jakości produkcji.

Uwagi: 1. Jeśli kryterium optymalizacji F jest złożone (wielokryterialne), zaleca się określić zbiór Pareto w celu uproszczenia obliczeń optymalizacyjnych, a także po to, by ułatwić intuicyjne rozumienie problemu konfliktu między kryteriami oceny (problemu kompromisu).

2. Ciągłość zbioru rozwiązań może być czasem umowne, np. własności materiałów handlowych nie są wielkościami ciągłymi.

Rodzaj II. Niecięgły, liczny lub bardzo liczny zbiór rozwiązań, co wynika stąd, że zbiór zmiennych jest liczny i że są one dyskretne. Model matematyczny nieanalityczny jest dość prosty. Przykłady: 1. Projekt układu elektronicznego o zadanym schemacie ideowym albo projekt płytki drukowanej. 2. Projekt wielostopniowej przekładni zębatej lub dowolny inny zbiór rozwiązań w metodzie morfologicznej [28]. 3. Harmonogram produkcji oddziału produkcyjnego, posiadającego wiele stanowisk roboczych i produkującego wiele odmian wytworów.

Uwaga: 1. Do tego przypadku może też być sprowadzone zadanie rodzaju I, jeśli dokonamy dyskretyzacji zmiennych. 2. Do tej grupy zaliczymy też przypadki, gdy model jest "nieodwracalny", np. znając natężenie przepływu płynu, można obliczyć spadek ciśnienia albo znając rodzaj tworzyw można określić współczynnik tarcia, natomiast odwrotnie zależności są trudne do obliczenia: wyznaczone są albo w sposób rekurencyjny, albo są niejednoznaczne.

Rodzaj III. Zbiór rozwiązań jest skończony, nieliczny (np. kilka). Zmienna decyzyjna może być tylko jedna (np. numer rozwiązania). Model ma-

tematyczny dany jest w postaci numerycznej (tabela lub wykres),często jest niekompletny (brak wszystkich zależności). Przykłady: 1. Wybór "katalogowy". 2. Wybór koncepcji ("optymalizacja międzywariantowa").

Uwagi: 1. Model matematyczny (w sensie równań matematycznych) nie jest potrzebny, ponieważ dokonuje się pełnego przeglądu rozwiązań, tzn. oblicza się wartość kryterium optymalizacji F dla wszystkich rozwiązań. 2. Działania 4, 5, 7 i 8 są bardzo proste (rys. 3.3 i 3.4).

Przykłady typowych zadań

1. Wybór ofertowy: zbiór wariantów (tutaj - ofert) niezbyt liczny,dysperesja na ogół niewielka, co wynika z wymagań (często dość ostrych),zbiór zmiennych decyzyjnych mało liczny (najczęściej wystarcza tylko jedna: numer oferty), część informacji dana deterministycznie, część nie ujawniona, brak modelu matematycznego obiektu.

2. Wybór koncepcji: nieliczny zbiór wariantów, często o dużej dysperesji, model matematyczny i informacje wejściowe niekompletne,częściowo dane w sposób rozmyty lub losowy, nadrzędne kryterium optymalizacji często dane w sposób rozmyty.

3. Optymalizacja parametryczna: zbiór wariantów ciągły, dużo zmiennych decyzyjnych (niektóre dyskretne), model matematyczny dany, nadrzędne kryterium optymalizacji dane.

4. Optymalizacja na zbiorze dyskretnym: zbiór wariantów skończony lecz bardzo liczny, duża liczba zmiennych decyzyjnych, wszystkie dyskretne,prosty model matematyczny dany, nadrzędne kryterium optymalizacji dane.

Jeśli zauważymy, że zadanie wyboru jest określone przez przedmiot,podmiot i metodę postępowania, to widzimy, że pokazana powyżej systematyka dotyczy głównie tego pierwszego aspektu. Pozostałe dwa czekają na opracowanie.

4. MATEMATYCZNY MODEL ZBIORU WARIANTÓW

4.1. Wstęp

Jak pokazano w rozdz. 3.6 ("Struktura procesu wyboru"), optymalizacja wymaga znajomości modelu matematycznego zbioru wariantów, tzn.zbioru formalnych związków między wartościami zmiennych decyzyjnych $\{x_p : p = \overline{1,P}\}$ oraz wartościami właściwości $\{y_r : r = \overline{1,R}\}$.

Modelem matematycznym zbioru wariantów nazwiemy zbiór więzów równościowych (3.23):

$$\{f_s(x_1,\ldots,x_P, y_1,\ldots,y_R) = 0 : s = \overline{1,S}\} \tag{4.1}$$

lub po ich rozwikłaniu (3.22):

$$\{y_z = f_z(x_1,\ldots,x_P) : z = \overline{1,Z}\} \tag{4.2}$$

Model matematyczny jest tu potrzebny do tego, aby ograniczenia sformułowane w przestrzeni decyzyjnej X przedstawić w przestrzeni celów Y i odwrotnie oraz po to, aby zadaniowe kryterium optymalizacji F, sformułowane jako funkcja wartości k_i kryteriów oceny $\{K_i : i = \overline{1,I}\}$

$$F = F(k_1,k_2,\ldots,k_I) \tag{4.3}$$

zapisać, dla celów optymalizacji, jako funkcję zmiennych decyzyjnych X:

$$F = F(x_1,x_2,\ldots,x_P) \tag{4.4}$$

Dla przypadku, gdy zbiór wariantów D (który w procesie projektowanie technicznego jest zawsze zbiorem ograniczonym ze względu na występowanie ograniczeń) jest zbiorem skończonym ("dyskretnym") i niezbyt licznym, jak np. zbiór koncepcji czy ofert, zależności (4.1) przedstawiamy zwykle w postaci:

$$\left.\begin{array}{l} y_r = y_r(v) : r = \overline{1,R} \\ \text{lub} \\ k_i = k_i(v) = k_{iv} : i = \overline{1,I} \end{array}\right\} \tag{4.5}$$

gdzie $v = \overline{1,V}$ jest kolejnym numerem wariantu. Wówczas v-ty wariant d_v jest jednoznacznie określony wektorem (3.31):

$$d_v = \left[x_{1v}, x_{2v}, \ldots, x_{Pv}\right]$$

Gdy D jest zbiorem ograniczonym o mocy continuum ("ciągłym") lub skończonym lecz bardzo licznym, związki (4.1) staramy się znaleźć w postaci jawnych funkcji ciągłych typu (4.2).

Wartość (lub rozkład wartości) k_{iv} kolejnych kryteriów k_i dla określonego wariantu d_v nazywać będziemy oceną v-tago wariantu ze względu na i-te kryterium. Oceny mogą mieć różną formę:

- liczb $k_i(d_v) = k_{iv}$ - dla oceny deterministycznej ostrej,
- funkcji rozkładu $f_i(d_v) = f_{iv}$ - dla oceny probabilistycznej
- lub funkcji przynależności $\mu_k(d_v) = \mu_{iv}$ - dla oceny rozmytej.

Związki $k_i(x_1, x_2, \ldots, x_P)$ mogą być liniowe ze względu na cechy konstrukcyjne x_p:

$$k_i = \sum_{p=1}^{P} c_{ip} x_p, \qquad (4.6)$$

gdzie $\{c_{ip}\}$ są stałymi lub nieliniowe; w drugim przypadku równania (4.5) mogą być rozwikływalne ze względu na niektóre zmienne.

Zależności (4.5) mogą mieć charakter funkcji o postaci analitycznej, wykresu lub tablicy. Ten ostatni przypadek może mieć miejsce wówczas, gdy wszystkie zmienne decyzyjne x_p są dyskretne (przez co zbiór rozwiązań d_v jest skończony). Kryteria oceny powinny być wielkościami mierzalnymi, jeśli jednak tak nie jest w konkretnym przypadku, stosuje się ocenę rozmytą lub tworzy się pewną sztuczną dyskretną skalę tej wielkości, np. "dobry", "akceptowalny", "zły" albo "plus" i "minus", albo inną skalę punktową. Taka ocena bywa nazywana oceną "jakościową" (co jednak wydaje się mylącym określeniem).

Wyniki oceny powinny być opatrzone analizą (choćby szacunkową) dokładności tych wyników, aby na końcu procesu wyboru można określić jednoznaczność rezultatów optymalizacji (patrz p. 6.3).

Rodzaje oceny

Ze względu na sposób uzyskiwania potrzebnej informacji szukanie modelu matematycznego zbioru wariantów może być robione "obiektywnie" lub "subiektywnie". Obiektywne jest wtedy, gdy zależności (4.1) szuka się na gruncie badań zjawisk fizycznych, ekonomicznych lub innych, wykorzystując uznane prawa (modele teoretyczne z literatury) albo ustala się je eksperymentalnie, wykorzystując modele fizyczne, ikoniczne czy symulacyjne, albo przyjmując informacje zawarte w katalogach czy ofertach. Ustalanie modelu jest subiektywne wtedy, gdy wykorzystuje się doświadczenia i intuicję ekspertów, nie żądając przy tym potwierdzenia obiektywnego. Najczęściej są to zależności dyskretne, gdyż są one łatwiejsze do intuicyjnego szacowania.

Ze względu na ujęcie formalne ocena może być deterministyczna ("ostra"), rozmyta (jeśli oceniana wielkość jest niemierzalna) lub losowa, gdy jej wartość podlega silnym wahaniom. W tym ostatnim przypadku, który jest związany z prognozowaniem, można wyróżnić prognozowanie jedno- lub wieloetapowe (patrz p. 4.4.2 - ocena sekwencyjna).

Oceniana zmienna (kryterium oceny) może być ciągła lub dyskretna, podobnie zmienne decyzyjne mogą być ciągłe lub dyskretne.

W konkretnym przypadku wybiera się rodzaj oceny zależnie od ważności zadania wyboru (patrz p. 3.7), liczności zbioru wariantów oraz od tego, jakie są dostępne źródła informacji i jakie mamy do nich zaufanie, a także od tego, czy są silne "zakłócenia", czyli czy oceniane kryterium silnie zależy od innych wielkości wpływających i jakie są ich wahania.

Typowe są następujące przypadki:

1. "Ciągły" zbiór wersji, określony w kategoriach ciągłych i dyskretnych zmiennych decyzyjnych x_p. Ocena polega na znalezieniu zależności $k_i(x_1, \ldots, x_P)$, gdzie $x_p \in \left[x_{p\,min}, x_{p\,max}\right]$ jak dla przypadku tzw. optymalizacji parametrycznej.

Przykład: optymalizacja pomiarowej sprężyny śrubowej. Rozwiązanie zdefiniowane jest za pomocą dwóch zmiennych ciągłych: x_1 - średnica zewnętrzna, x_2 - liczba zwojów - oraz dwóch zmiennych dyskretnych (co w tym przypadku spowodowane jest normalizacją): x_3 - średnica drutu, x_4 - rodzaj tworzywa.

Jednym z kryteriów oceny (k_1) niech będzie naprężenie zastępcze w skrajnych włóknach.

Celem oceny jest znalezienie związku: $k_1 = k_1(x_1, x_2, x_3, x_4)$. Szukany związek wynika z praw mechaniki i przyjętej hipotezy wytrzymałościowej i ma charakter analityczny.

2. Nieliczny zbiór rozwiązań, nieanalityczne dyskretne zmienne decyzyjne (np. liczby porządkowe lub nazwy). Zbiór rozwiązań jest iloczynem kartezjańskim zbiorów wartości tych zmiennych. Na przykład wstępne projektowanie układu regulacji automatycznej. Zmienne decyzyjne są dwie: x_1 - typ (x_{11} - elektryczny, x_{12} - pneumatyczny, x_{13} - hydrauliczny), x_2 - rodzaj pracy (x_{21} - ciągły, x_{22} - przerywany).

Niech jednym z kryteriów (k_1) będzie niezawodność: nie da się napisać analitycznego wzoru $k_1 = k_1(x_1, x_2)$. Każdemu rozwiązaniu d_v, $v = 1, \ldots, 6$ należy przypisać odpowiednią wartość niezawodności k_1. Podobnie jest w przypadku wyboru z katalogów.

Źródłami informacji podczas oceny są:

- literatura naukowa (prawa naukowe, wyniki badań statystycznych) i literatura handlowa (w przypadku wyboru wariantu ze zbioru katalogowego lub spośród ofert),
- eksperci (ze sfery wytwarzania, dystrybucji lub eksploatacji),
- badania własne, pomiary, wyniki symulacji itp.,
- własne doświadczenie i intuicja.

4.2. Kryteria oceny

W tej pracy zakładamy (por. rozdz. 5), że jakość projektowanego wytworu zależy od skończonej liczby wielkości, opisujących właściwości eksploatacyjne, technologiczne, ekonomiczne i inne tego wytworu. Te spośród nich, które uznamy za argumenty nadrzędnego kryterium optymalizacji Φ (patrz p. 5.4), nazwiemy kryteriami oceny $K = \{K_i : i = \overline{1,I}\}$ (inne spotykane w literaturze nazwy: atrybuty jakości, aspekty jakości, kryteria, właściwości, osiągi). Są one podzbiorem właściwości konstrukcyjnych: $K = \{K_i\} \subset Y$.

Kryteria oceny są cząstkowymi miarami jakości przedmiotu projektowania ze względu na wcześniej przyjęte kryterium nadrzędne Φ. Ponieważ to ostatnie nie musi być sformułowane jednoznacznie, w ogólnym przypadku ustalanie listy kryteriów oceny może być trudnym heurystycznym zadaniem.

Wszystkim kryteriom K_i stawiamy następujące wymagania:

1. Powinny wynikać z kryterium nadrzędnego Φ.
2. Powinny być wyczerpujące, tzn. tak dobrane, aby w pełni opisywały Φ (tzn. aby w całości pokazywały "pole znaczeniowe" Φ).
3. Liczność I zbioru kryteriów powinna być możliwie mała, przy czym tym większa, im jest większa "kompleksowość" Φ i im ważniejsze jest zadanie wyboru.
4. Każde kryterium oceny powinno być stosowalne w odniesieniu do wszystkich wariantów $d \in D$, np. kryterium "stałość napięcia wyjściowego" nie może być zastosowane do zasilaczy pneumatycznych.
5. Wszystkie kryteria oceny powinny być zdefiniowane i mierzalne, choć dopuszcza się tu pewne odstępstwa (np. opis rozmyty, por. p. 4.3).
6. Powinny być dostępne pomiarowo, tzn. powinna istnieć możliwość wyznaczenia wartości każdego kryterium k_i dla każdego wariantu $d \in D$ w danej fazie procesu projektowania (patrz p. 4.1).
7. Powinny być wzajemnie niezależne, tzn. każda cecha jakościowa projektowanego obiektu powinna być opisana przez tylko jedno kryterium oceny. Przykładowo, wymagania tego nie spełniają następujące zbiory kryteriów wzajemnie zależnych:

a) "niezawodność" i "średni czas między uszkodzeniami",
b) "łatwość montażu" i "koszt zainstalowania",

c) "moc wyjściowa", "impedancja wyjściowa", "stabilność ciśnienia wyjściowego" zasilacza pneumatycznego.

Dwa kryteria: "dokładność manometru" i "koszt wykonania manometru" są kryteriami wzajemnie uwarunkowanymi przez związki fizykoekonometryczne ale wzajemnie niezależnymi, bo opisują zupełnie inne cechy manometru. Podobnie: "gabaryty przyrządu" i "ciężar przyrządu".

Poniżej podamy pewne zasady, które mogę być pomocne przy ustalaniu listy kryteriów. Zakładamy przy tym, że dane jest nadrzędne kryterium optymalizacji Φ, niekoniecznie dobrze i jednoznacznie sformułowane, np. "łatwość eksploatacji urządzenia". Poza tym dane są wszystkie ograniczenia S oraz zbiór rozwiązań A. Kolejność czynności powinna być następująca:

1. Ustalenie wstępnej listy kryteriów.
2. Sprawdzenie kryteriów.
3. Redukcja listy kryteriów.

ad 1. Do ustalenia listy wstępnej mogą być pomocne następujące metody:

a) Przegląd listy wymagań S, obowiązujących w danym zadaniu projektowym (patrz p.3.4.2). Te wielkości, które powinny mieć wartości ekstremalne w optymalnej wersji rozwiązania projektowego, włączamy do listy kryteriów.

b) Wykorzystanie wzorcowych list kryteriów, które istnieją dla pewnych dziedzin techniki. Przykładem może być norma PN-74/M-42020, określająca normatywny zbiór kryteriów oceny dla urządzeń i układów automatyki. Innym przykładem jest lista 721 kryteriów (nie spełniających warunku niezależności), według których NASA ocenia różne obiekty militarne i kosmiczne, wytwarzane dla Pentagonu [15] albo lista Kolmana [33], gdzie za pomocą 56 kryteriów ocenia się "poziom nowoczesności" projektu. Do metod tej grupy można zaliczyć "Metodę listy kontrolnej" i "Metodę doboru kryteriów" podane przez Jonesa [28] (metody 6.1 i 6.2).

Projektanci często zadowalają się analizę danych techniczno-ekonomicznych (np. katalogowych) dla podobnych gotowych obiektów tej samej klasy lub o podobnym przeznaczeniu.

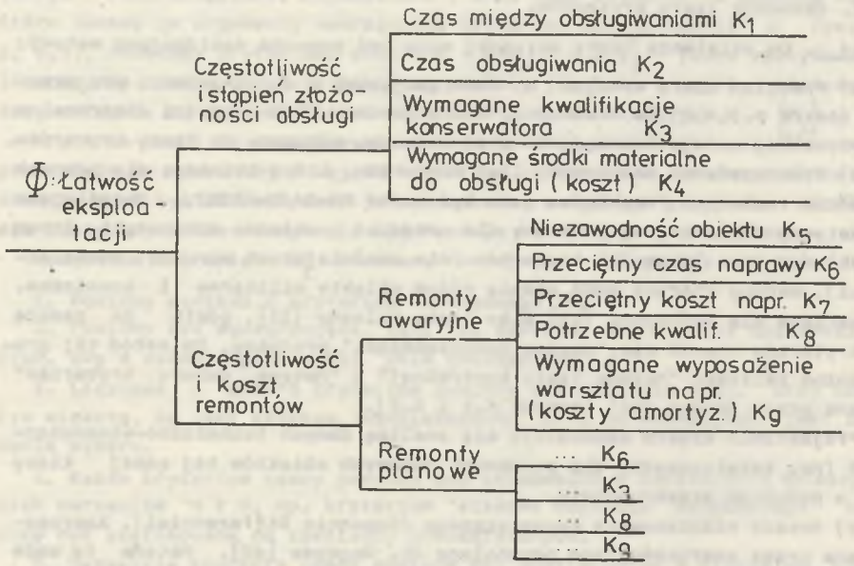
c) Metodę różnicowania semantycznego (Semantic Differential), zaproponowana przez amerykańskiego psychologa Ch. Osgooda [49]. Metoda ta może być szczególnie przydatna dla tych przypadków, kiedy jakość ocenianych obiektów zależy od nieznanego i trudnego do określenia zbioru kryteriów jakości albo kiedy jest ich nader wiele i większość z nich jest niemierzalna, a nawet niezdefiniowana.

L. Wiggins [89] użyła tej metody do znalezienia kryteriów oceny jakości rozwiązań architektonicznych, a Strzałecki [62] do określenia struktury znaczeniowej pojęcia nowości rozwiązań wynalazczych.

d) Metoda zdarzeń i sprzężeń [67] polega na tym, że tworzy się zbiór kolejnych etapów "życia" danej konstrukcji: projektowanie, wytwarzanie, montaż, uruchamianie, eksploatacja itd. oraz zbiór elementów szeroko rozumianego "otoczenia" obiektu danej konstrukcji, np.: związane z nim układy

techniczne, pomieszczenia, obsługa, inni ludzie, środowisko naturalne, środowisko kulturowe itd. Następnie tworzy się i bada elementy iloczyny kartezjańskiego tych zbiorów. Mogę to być pewne procesy (np. proces obsługi gwarancyjnej) lub zdarzenia (np. oddziaływanie obiektu na wody gruntowe). Analizując te powiązania ze względu na nadrzędne kryterium optymalizacji Φ tworzymy listę kryteriów. Metoda ta może być szczególnie przydatna podczas projektowania obiektów, co do których projektant nie ma zbyt dużego doświadczenia oraz do sprawdzania kompletności listy kryteriów oceny.

e) Metoda drzewa celów [7]; polega na tym, że buduje się graf (drzewo) celów. Pniem jest nadrzędne kryterium optymalizacji, gałęziami - kryteria o kolejno rosnącej szczegółowości. Rozdrabnianie danej gałęzi kończymy, gdy dojdziemy do kryterium mierzalnego. Na każdym poziomie pytamy: "jak to osiągnąć?" albo "co to znaczy?" albo "po co to jest potrzebne?" - patrz przykład z rys. 4.1.



Rys. 4.1. Przykład zastosowania metody drzewa celów

Metoda ta jest szczególnie przydatna do przekształcania niezdefiniowanego (niejednoznacznie sformułowanego) kryterium nadrzędnego w zbiór konkretnych wielkości fizycznych lub ekonomicznych.

ad 2. Sprawdzanie, czy wszystkie kryteria spełniają wymagania podane na początku rozdziału 4.2. Do sprawdzania wzajemnej niezależności można posłużyć się metodami statystycznymi, np. analizą korelacyjną o ile istnieje już zbiór gotowych (wytwarzanych) wyrobów podobnego typu (np. zawory,

pojazdy, hale fabryczne itp.). W pozostałych przypadkach można robić to intuicyjnie.

Dużą trudność może nastręczyć doprowadzenie wszystkich kryteriów do mierzalności. Można tu zaproponować następujące sposoby:

- spróbować znaleźć inną, zastępczą wielkość mierzalną (np. miarę bezpieczeństwa obsługi może być prawdopodobieństwo wypadku),
- zastosować metodę drzewa celów [7],
- zastosować formalizację za pomocą funkcji przynależności do zbioru rozmytego (patrz p. 4.3),
- zastosować metodę "Semantic Differential" [49].

ad 3. Redukcja listy. Uznaje się za racjonalne, aby lista kryteriów nie obejmowała więcej niż 7 do 9 kryteriów. Postuluje to psychologiczne teoria decyzji [36], jednocześnie badania statystyczne pokazują, że np. 20% najważniejszych kryteriów wpływa w 80% na jakość ocenianego obiektu (tzw. krzywa Lorenca). Należy zatem uporządkować dany zbiór kryteriów wg ich malejącego znaczenia (używając do tego celu np. metody decyzji wymuszonych) i odrzucić mniej ważne, przenosząc je do zbioru wymagań.

4.3. Ocena rozmyta

Ocena rozmyta może być stosowana dla przypadku:

a) niezdefiniowanego (tym samym niemierzalnego) kryterium oceny, np. "wygoda użytkownika", "poczucie bezpieczeństwa", "atrakcyjność handlowa";
b) gdy kryterium jest wprawdzie mierzalne, ale niedostępne pomiarowo i ocena musi być zrobiona subiektywnie. Może to dotyczyć tylko niektórych wariantów, np. jak w przypadku wyboru katalogowego, gdy producent nie podaje pełnego zestawu danych (np. właściwości dynamicznych).

Zgodnie z p. 4.2 wszystkie kryteria oceny powinny być mierzalne i dostępne pomiarowo w danej fazie projektowania. Może się jednak zdarzyć, że nie da się dotrzymać tego warunku (np. gdy jednym z kryteriów jest niezawodność układu). Jeżeli dane kryterium jest nadto jednym z ważniejszych w danym zbiorze, projektant może uznać, że znalezienie innej miary albo ocena punktowa jest niezadowalającym sposobem ze względu na zbyt dużą dowolność oceny. Może się też zdarzyć, że ekspert (subiektywnie oceniający) odmówi stawiania ocen ostrych. W tych przypadkach zastosowanie ocen rozmytych może być bardzo skutecznym sposobem ujmowania nieokreśloności.

Do ilościowego opisu rozmytości służy funkcja przynależności $\mu_i(k_i)$ taka, że każdej wartości k_{iv} z pewnego przedziału $[k_{i\,min}, k_{i\,max}]$ przyporządkowuje liczbę rzeczywistą z przedziału $[0,1]$

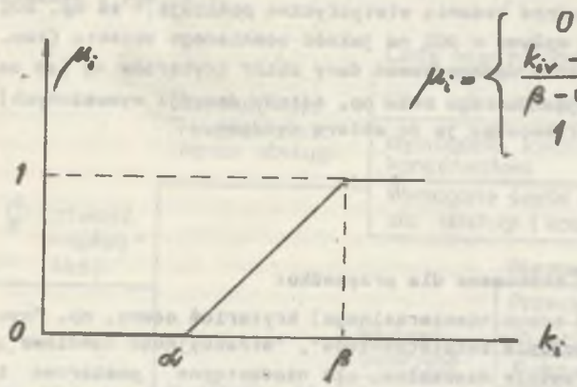
$$\mu_i : [k_{i\,min}, k_{i\,max}] \rightarrow [0, 1] \qquad (4.7)$$

Dla celów formalizacji wygodnie jest stosować pewne standardowe klasy tej funkcji, np.:

1. Postać liniową (rys. 4.2).
2. Rozkład trójkątny symetryczny (rys. 4.3) lub rozkłady niesymetryczne lub trapezowe.
3. S-funkcje [52], (rys. 4.4).
4. Π-funkcje [52], (rys. 4.5).

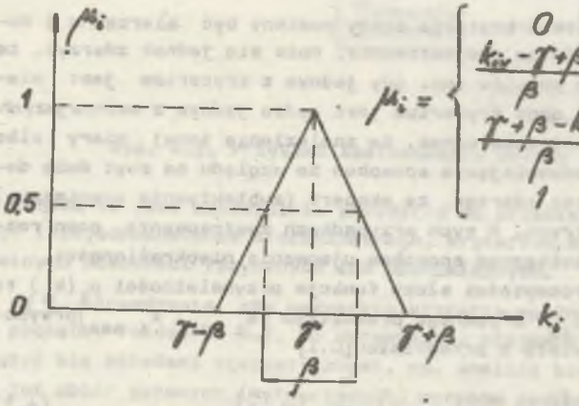
Mówimy, że ocena rozmyta d_{iv} (dla v-tego wariantu ze względu na i-te kryterium oceny) jest sformułowana, gdy dane są [80]:

1. Zbiór dopuszczalnych ocen ("repertuar ocen") $P_i = \left\{ P_{ij} : j = \overline{1, J_i} \right\}$.



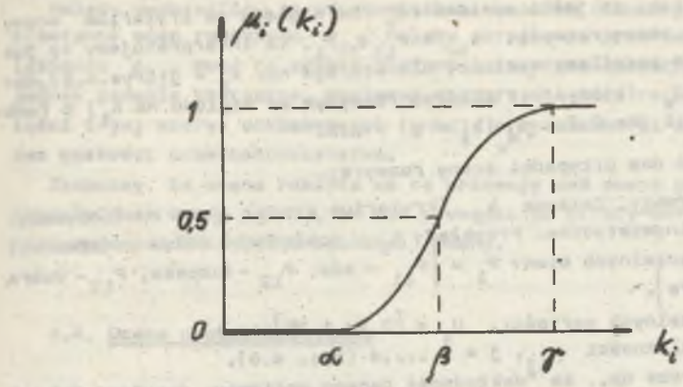
$$\mu_i = \begin{cases} 0 & k_{iv} \leq \alpha \\ \dfrac{k_{iv} - \alpha}{\beta - \alpha} & k_{iv} \in [\alpha, \beta] \\ 1 & k_{iv} \geq \beta \end{cases}$$

Rys. 4.2. Standardowa liniowa postać funkcji przynależności

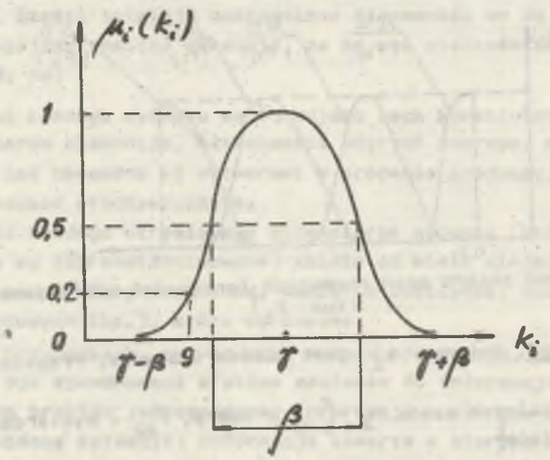


$$\mu_i = \begin{cases} 0 & k_{iv} \leq \gamma - \beta \\ \dfrac{k_{iv} - \gamma + \beta}{\beta} & k_{iv} \in [\gamma - \beta, \gamma] \\ \dfrac{\gamma + \beta - k_{iv}}{\beta} & k_{iv} \in [\gamma, \gamma + \beta] \\ 1 & k_{iv} \geq \gamma + \beta \end{cases}$$

Rys. 4.3. Standardowa trójkątna postać funkcji przynależności



Rys. 4.4. Standardowa S-funkcja przynależności



Rys. 4.5. Standardowa Π- funkcja przynależności

2. Zbiór wartości i-tego kryterium: $U_i = \left[k_{i\,min}, k_{i\,max} \right]$.
3. Funkcje przynależności dla każdej oceny P_{ij}

$$\mu_{ij} : U_i \to [0, 1] \tag{4.8}$$

Wówczas zdanie: k_{iv} jest P_{ij} oznacza, że

$$P_{ij} = \left\{ (k_{iv}, \mu_{ij}(k_{iv})) \quad k_{iv} \in U_i, \mu_{ij} : U_i \to [0, 1] \right\}, \tag{4.9}$$

gdzie $P_{ij} \in P_i$
i stanowi ocenę rozmytą.

rozumiemy to tak, że jeśli wariant d_v ze względu na kryterium oceny K_i uzyskał j-tą ocenę rozmytą: $k_{iv} = P_{ij} \in P_i$, to interpretujemy to jak następuje: pewien pomyślany wariant, dla którego np. $k_1 = g$ (rys.4.5), należy do zbioru d_v (który jest zbiorem rozmytym ze względu na K_i) z funkcją przynależności $\mu = 0{,}2 : \mu_{d_v}(k_1 = g) = 0.2$.

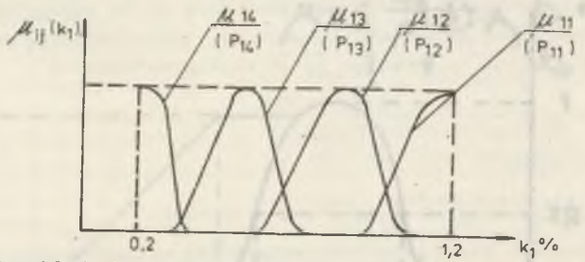
Można wyróżnić dwa przypadki oceny rozmytej.

Przypadek pierwszy. Zmienna k_i (kryterium oceny) jest zdefiniowana, ale ocena jest lingwistyczna. Przykład: k_1 - dokładność (błąd podstawowy) [%]. Zbiór dopuszczalnych ocen: $P_1 = \{P_{11}$ - zła, P_{12} - kiepska, P_{13} - dobra, P_{14} - bardzo dobra$\}$.

Zbiór dopuszczalnych wartości: $U_1 = [0{,}2; 1{,}2\%]$.

Funkcja przynależności μ_{ij}, $j = 1,\ldots,4$ (rys. 4.6).

Ekspert stwierdza np., że "dokładność danego wariantu d_v jest dobra", co odpowiada stwierdzeniu, że k_1 wariantu d_v jest P_{13}.

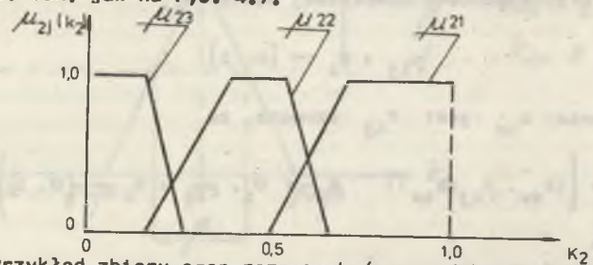


Rys. 4.6. Przykład zbioru ocen rozmytych (przypadek zdefiniowanego kryterium K_i)

Przypadek drugi. Zmienna k_i jest niezdefiniowana. Przykład: k_2 - funkcjonalność.

Zbiór dopuszczalnych ocen: $P_2 = \{P_{21}$ - dobra, P_{22} - wystarczająca, P_{23} - ledwie wystarczająca$\}$.

Zbiór dopuszczalnych wartości U_2: ponieważ zmienna k_2 nie ma swojej naturalnej miary (jest niemierzalna), możemy jej przypisać pewną sztuczną skalę bezwymiarową znormalizowaną: $U_2 = [0, 1]$. Funkcje przynależności określimy np. tak, jak na rys. 4.7.



Rys. 4.7. Przykład zbioru ocen rozmytych (przypadek niezdefiniowanego kryterium K_2)

Należy podkreślić, że od obowiązków eksperta (zanim przystąpi on do stawiania ocen rozmytych P_{iv}) należy określenie przebiegu funkcji przynależności μ_{ij}. Może to zrobić nieformalnie przez naszkicowanie. Jest to jednak zadanie krytyczne, ponieważ ekspert nie musi rozumieć sensu rozmytości i jej miary, utożsamiając funkcję przynależności ze swoistym rozkładem gęstości prawdopodobieństwa.

Zauważmy, że ocena rozmyta ma tę przewagę nad oceną punktową (która w istocie jest oceną ostrą), że nie prowadzi do utraty informacji co do nieprecyzyjności (niejednoznaczności) oceny.

4.4. Ocena probabilistyczna

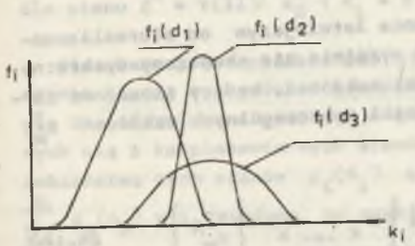
4.4.1. Ocena jednoetapowa

Ocena deterministyczna jest z reguły tylko aproksymacją przyszłej rzeczywistości. Często istnieje uzasadniona niepewność co do wartości ocen k_{iv}. Dokładniejsza analiza wskazuje, że są one wielkościami losowymi. Wynika to stąd, że:

- właściwości każdego wytworu są funkcjami cech konstrukcyjnych (kształtów i wymiarów elementów, właściwości użytych tworzyw, stanów początkowych), te zaś nadawane są wytworowi w procesie produkcyjnym, który jest zawsze procesem stochastycznym;
- właściwości każdego określonego egzemplarza wytworu (którego cechy konstrukcyjne są już zdeterminowane) zależą od wielu wielkości zakłócających (np. temperatury otoczenia, napięcia zasilania, właściwości materiałów wsadowych itp.), które są losowe;
- w pewnych przypadkach, np. podczas wyboru ofertowego, niepewność co do ocen może być spowodowana brakiem zaufania do informacji podanych w ofercie albo brakiem jednoznacznej informacji w ofercie lub wreszcie niestacjonarnością sytuacji: informacje zawarte w ofercie czy katalogu mogą ulegać zmianie (np. niezawodność).

Należy więc ocenić pewien skończony zbiór obiektów $D = \{d_v, v = \overline{1,V}\}$ ze względu na określone kryterium oceny k_i, przy czym zakładamy, że k_i może zostać określone na zbiorze D. W najprostszym przypadku określamy rozkład prawdopodobieństwa k_i dla każdego wariantu d_v (rys. 4.8).

Jeżeli wielkość k_i jest ciągła, określić możemy np. rozkład gęstości prawdopodobieństwa $f_i(d_v) = f_{iv}$.



Rys. 4.8. Ocena prebabilistyczna dla skończonego zbioru wariantów $d_1,\ldots,d_V$. k_i - kryterium oceny, f_i - gęstość prawdopodobieństwa

Jeżeli zbiór wariantów D jest zbiorem "ciągłym", wówczas f_{iv} mogą być wyrażone analitycznie:

$$f_{iv} = f_{iv}(x_1,\ldots,x_P) \qquad (4.10)$$

Jeśli zależy na możliwie dokładnej ocenie, a określenie rozkładów f_{iv} jest trudne, można poddać analizie przyczyny losowości k_{iv}.

Załóżmy, że kryterium oceny k_i jest funkcją pewnego zbioru wielkości wpływających (cech konstrukcyjnych i wielkości zakłócających),o czym wspomniano powyżej, zwanych dalej zakłóceniami z_m, $m = \overline{1,M}$. Załóżmy,że są one wzajemnie niezależne statystycznie oraz że dane są funkcje:

$$k_{iv} = k_{iv}(z_1,\ldots,z_m,\ldots,z_M) \qquad v = \overline{1,V} \qquad (4.11)$$

Załóżmy dalej, że znane są rozkłady prawdopodobieństwa poszczególnych zakłóceń z_m. Jeżeli są to wielkości ciągłe, rozkłady mogą być określone przez gęstości prawdopodobieństwa $f(z_m)$. Korzystając z praw rachunku prawdopodobieństwa możemy znaleźć szukane rozkłady gęstości prawdopodobieństwa: $f_i(d_v) : v = \overline{1,V}$.

Przykład. Określić rozkład prawdopodobieństwa błędu instrumentalnego k_1[%] pewnej wereji konstrukcji przyrządu pomiarowego. Ustalamy losowe zakłócenia: z_1 - błęd podstawowy, [%], z_2 - różnica temperatury otoczenia od wartości nominalnej (znamionowej), [deg], z_3 - różnica napięcia zasilania od wartości znamionowej, [V]. Niech oceniany błęd wyraża się następującą zależnością aproksymacyjną: $k_1 = z_1 + a_2z_2 + a_3z_3$, gdzie a_2 jest współczynnikiem błędu temperaturowego[%/deg], a a_3 jest współczynnikiem błędu zasilania [%/V]. Ustalamy rozkłady gęstości prawdopodobieństwa $f(z_1)$, $f(z_2)$ i $f(z_3)$. Niech będą to rozkłady normalne o wartościach oczekiwanych E_1, E_2 i E_3 oraz wariancjach σ_1^2, σ_2^2, σ_3^2. Wówczas szukany rozkład gęstości prawdopodobieństwa błędu instrumentalnego k_1 będzie rozkładem normalnym o wartości oczekiwanej $E(k_1) = E_1 + a_2E_2 + a_3E_3$ oraz wariancji $\sigma^2(k_1) = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2$.

Częstym przypadkiem w praktyce, znacznie łatwiejszym od sformalizowania danych wejściowych, jest taki, kiedy wyróżnia się skończony dyskretny zbiór stanów $\{Z^t;\ t = \overline{1,T}\}$ w przestrzeni zakłóceń, będący iloczynem kartezjańskim wyróżnionych dyskretnych wartości poszczególnych zakłóceń $z_m^{j_m}$, $j = \overline{1,J_m}$, $m = \overline{1,M}$:

$$Z^t_{t=\overline{1,T}} = \left\{z_1^{j_1}\right\}_{j_1=\overline{1,J_1}} \times \ldots \times \left\{z_m^{j_m}\right\}_{j_m=\overline{1,J_m}} \times \ldots \times \left\{z_M^{j_M}\right\}_{j_M=\overline{1,J_M}} \qquad (4.12)$$

Jeżeli każdemu $z_m^{j_m}$ przypisac odpowiednie prawdopodobieństwo $p_m^{j_m}$,gdzie dla każdego $m \in [1,M]$ zachodzi: $\sum_{j=1}^{J_m} p_m^{j_m} = 1$, to prawdopodobieństwa odpowiednich stanów Z^t są iloczynami prawdopodobieństw odpowiednich stanów zakłóceń p_m, przy czym $\sum_{t=1}^{T} p(Z^t) = 1$.

Przykład. Określić rozkład prawdopodobieństwa kosztu produkcji k_1 [zł] pewnej wereji konstrukcji. Ustalamy, że koszt zależy od normy czasu t [godz] na wykonanie i stawki godzinowej wykonawcy z_2 [zł/godz]. Norma czasu t niech będzie deterministyczną funkcji jakości z_1 dostarczanych elementów: $t = t(z_1)$, gdzie z_1 jest numerem klasy jakości. Wyróżnione zostały następujące dyskretne wartości zakłóceń z_1^1 = I, z_1^2 = II, $z_2^1 = 20$, $z_2^2 = 25$ i $z_2^3 = 40$ oraz przypisano im następujące prawdopodobieństwa: $p_1^1 = 0{,}6$, $p_1^2 = 0{,}4$, $p_2^1 = 0{,}2$, $p_2^2 = 0{,}3$, $p_2^3 = 0{,}5$. Niech funkcje $t(z_1)$ ma następujące wartości $t(I) = 2$ oraz $t(II) = 3$, a jej rozkład prawdopodobieństwa jest taki sam jak jej argumentu, gdyż jest to zależność deterministyczna od jednej zmiennej losowej z_1. Tworząc iloczyn kartezjański dyskretnych wartości t i z_2 oraz mnożąc odpowiednie prawdopodobieństwa otrzymujemy następujący dyskretny rozkład prawdopodobieństwa kryterium k_1:

dla stanu $Z^1 = t(I) \wedge z_2^1 : k_1^1 = 2 \cdot 20 = 40$ zł oraz $p^1 = 0{,}4 \cdot 0{,}2 = 0{,}08$

dla stanu $Z^2 = t(II) \wedge z_2^1 : k_1^2 = 3 \cdot 20 = 60$ zł oraz $p^2 = 0{,}6 \cdot 0{,}2 = 0{,}12$

dla stanu $Z^3 = t(I) \wedge z_2^2 : k_1^3 = 2 \cdot 25 = 50$ zł oraz $p^3 = 0{,}4 \cdot 0{,}3 = 0{,}12$

dla stanu $Z^4 = t(II) \wedge z_2^2 : k_1^4 = 3 \cdot 25 = 75$ zł oraz $p^4 = 0{,}6 \cdot 0{,}3 = 0{,}18$

dla stanu $Z^5 = t(I) \wedge z_2^3 : k_1^5 = 2 \cdot 40 = 80$ zł oraz $p^5 = 0{,}4 \cdot 0{,}5 = 0{,}20$

dla stanu $Z^6 = t(II) \wedge z_2^3 : k_1^6 = 3 \cdot 40 = 120$ zł oraz $p^6 = 0{,}6 \cdot 0{,}5 = 0{,}30$.

Dla oceny prawdopodobieństw zdarzeń lub stanów można wykorzystac twierdzenie Bayesa o prawdopodobienstwie a posteriori. Załóżmy, że analizuje się dwa skorelowane procesy A i F. Proces A może przyjęć n wykluczających się i komplementarnych stanów (zdarzeń) A_i, $i = 1,\ldots,n$. Prawdopodobieństwa tych stanów $p_i(A_i)$ są znane a priori i spełniają warunek: $\sum_{i=1}^{n} p_i(A_i) = 1$. Wiadomo, że zaszło pewne zdarzenie F (prognoza), związane z procesem A i znamy wszystkie prawdopodobieństwa $p(F/A_i)$,$i=1,\ldots,n$. Wówczas prawdopodobieństwo, że zajdzie A_i, jest:

$$p(A_i/F) = \frac{p(A_i) \cdot p(F/A_i)}{\sum_{j=1}^{n} p(A_j) \cdot p(F/A_j)}, \qquad (4.13)$$

gdzie:

$p(A_i/F)$ - prawdopodobieństwo a posteriori, że zajdzie A_i, gdy F zaszło,

$p(A_i)$, $p(A_j)$ - prawdopodobieństwa a priori,

$p(F/A_i)$ - prawdopodobieństwo że zajdzie F gdy zaszło A_i (wiarygodność prognozy F dla zdarzenia A_i), na podstawie doświadczenia z przeszłości,

$p(F/A_j)$ - prawdopodobieństwo, że zajdzie F, gdy zaszło $A_j \neq A_i$ (probabilistyczna miara błędu prognozowania).

Przykład. Należy ocenić prawdopodobieństwo, że pewna wersja projektowanego przyrządu pomiarowego znajdzie się w drugiej klasie dokładności (A_2). Wyróżniono trzy klasy i obliczenia wykazały następujące prawdopodobieństwa: $p(A_1) = 0,2$, $p(A_2) = 0,5$ oraz $p(A_3) = 0,3$. Badania eksperymentalne (F) wykazały, że oceniana wersja znajdzie się w klasie trzeciej ($F = F_3$). Należy obliczyć, jakie jest skorygowane prawdopodobieństwo,że przyrząd znajdzie się mimo to w klasie drugiej: $p(A_2/F_3)$, jeśli adekwatność badań (trafność prognozy) na podstawie oceny dotychczasowych wyników jest następująca (tablica):

	F_1	F_2	F_3
A_1	$p(F_1/A_1) = 0,8$	$p(F_2/A_1) = 0,2$	$p(F_3/A_1) = 0$
A_2	$p(F_1/A_2) = 0,1$	$p(F_2/A_2) = 0,7$	$p(F_3/A_2) = 0,2$
A_3	$p(F_1/A_3) = 0,15$	$p(F_2/A_3) = 0,25$	$p(F_3/A_3) = 0,6$

Szukane prawdopodobieństwo wyniesie:

$$p(A_2/F_3) = \frac{p(A_2) \cdot p(F_3/A_2)}{p(A_1) \cdot p(F_3/A_1) + p(A_2) \cdot p(F_3/A_2) + p(A_3) \cdot p(F_3/A_3)} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot 0,2}{0,2 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0,6} = 0,357 \cong 0,4$$

Prawdopodobieństwo, że znajdzie się w klasie trzeciej (A_3), jest:

$$p(A_3/F_3) = \frac{p(A_3) \cdot p(F_3/A_3)}{p(A_1) \cdot p(F_3/A_1) + p(A_2) \cdot p(F_3/A_2) + p(A_3) \cdot p(F_3/A_3)} =$$

$$= \frac{0,3 \cdot 0,6}{0,2 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0,6} = 0,64 \cong 0,6$$

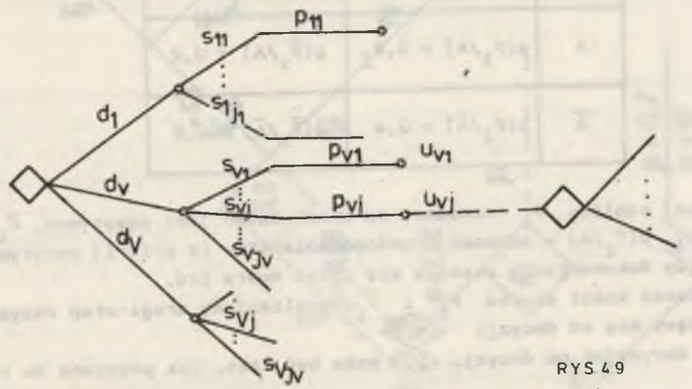
oraz

$$p(A_1/F_3) = 0$$

W praktyce projektowej zdarzeniem F (prognozę) może być twierdzenie eksperta, wynik badań dodatkowych lub jakieś zjawisko związane z procesem A, np. popyt na aparaturę kontrolno-pomiarową (A) spada w okresie recesji gospodarczej (F) lub jakość projektu (A) związana jest z nazwiskiem autora (F) lub z czasem przydzielonym na wykonanie projektu (F), itp.

4.4.2. Ocena sekwencyjna (wieloetapowa)

Sytuacje decyzyjne przedstawia się często za pomocą grafów, nazywanych drzewami decyzyjnymi. Jednoetapowy proces decyzyjny pokazuje rys. 4.9.



RYS 49

Rys. 4.9. Drzewo decyzji jednego etapu, $d = \{d_v : v = \overline{1,V}\}$ - zbiór dopuszczalnych wariantów decyzji, $s_{vj} : j = \overline{1,J_v}$ - losowe skutki wywołane decyzję d_v (stany natury), p_{vj} - prawdopodobieństwo, u_{vj} - koszt lub użyteczność sytuacji s_{vj}

Każdej decyzji d_v można przypisać oczekiwaną wartość funkcji użyteczności (patrz p. 5.5.3):

$$u_v(d_v) = \sum_{j=1}^{J_v} p_{vj} u_{vj} \qquad (4.14)$$

Jako racjonalny wybiera się np. ten wariant, dla którego wartość oczekiwana kosztu jest najmniejsza (lub użyteczności - największa).

Ocena sekwencyjna to taka, gdy do oceny v-tego wariantu analizuje się decyzje, jakie będzie można podejmować w przypadku, gdy sytuacja s_{vj} stanie się faktem.

Przykład. Należy ocenić (i wybrać najlepszy) dwa warianty sposobu weryfikacji dokumentacji konstrukcyjnej: czy budować i badać model fizyczny (K), czy też przekazać dokumentację bez badań modelowych, po jej "teoretycznym" sprawdzeniu ($\bar{K}$), (rys. 4.10). Prawdopodobieństwo, że dokumentacja okaże się dobra (A) bez badań modelowych oceniamy jako $p(A) = 0,7$, zatem $p(\bar{A}) = 0,3$. Oceniamy też (na podstawie dotychczasowych doświadczeń), że wiarygodność badań modelowych jest następująca:

	F_1	$\bar{F}_1$
A	$p(F_1/A) = 0,8$	$p(\bar{F}_1/A) = 0,2$
$\bar{A}$	$p(F_1/\bar{A}) = 0,4$	$p(\bar{F}_1/\bar{A}) = 0,6$

W powyższej tablicy F_1 oznacza, że wynik badań jest pozytywny, $\bar{F}_1$ - że negatywny, $p(F_1/A)$ - oznacza prawdopodobieństwo (a priori) pozytywnego wyniku, gdy dokumentacja okazała się potem dobra itd.

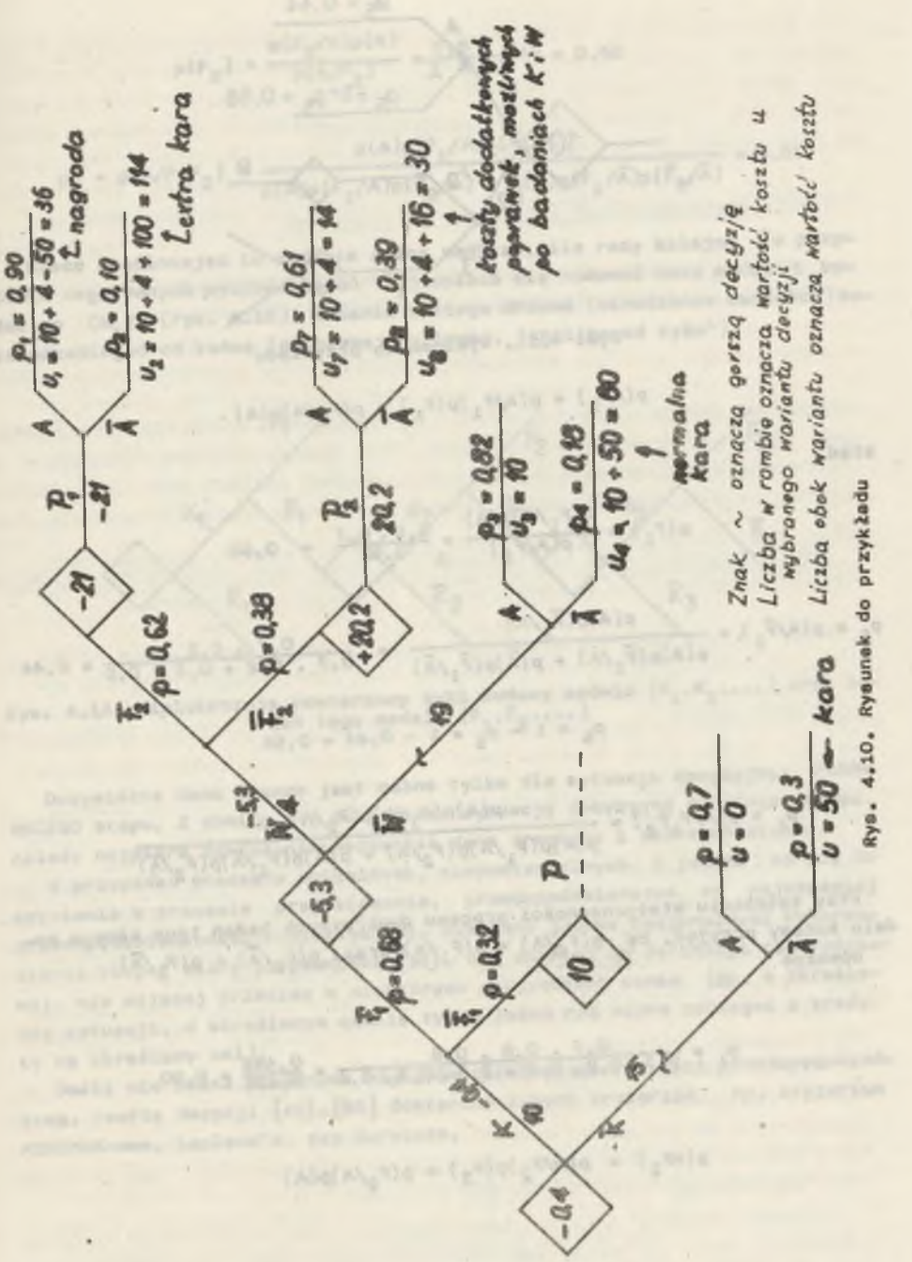
Aby oszacować koszt skutku F_1 i $\bar{F}_1$, analizujemy drugi etap decyzyjny, zaczynający się od decyzji $\langle -5,3 \rangle$.

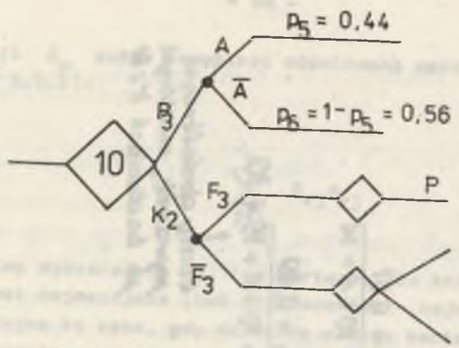
Sytuacja decyzyjna po decyzji $\langle 10 \rangle$ może być taka, jak pokazano na rys. 4.11.

Wartości prawdopodobieństw p_i obliczono ze wzoru Bayesa (4.13) jak następuje:

$$p_3 = p(A/F_1) = \frac{p(A) \cdot p(F_1/A)}{p(A)p(F_1/A) + p(\bar{A})p(F_1/\bar{A})} = \frac{0,7 \cdot 0,8}{0,7 \cdot 0,8 + 0,3 \cdot 0,4} = 0,82$$

$$p_4 = 1 - p_3 = 1 - 0,82 = 0,18$$





Rys. 4.11. Rysunek do przykładu

$$p(AF_1) = p(A/F_1)p(F_1) = p(F_1/A)p(A)$$

stąd

$$p(F_1) = \frac{p(F_1/A)p(A)}{p(A/F_1)} = \frac{0,8 \cdot 0,7}{0,82} = 0,68$$

$$p_5 = p(A/\bar{F}_1) = \frac{p(A)p(\bar{F}_1/A)}{p(A)p(\bar{F}_1/A) + p(\bar{A})p(\bar{F}_1/\bar{A})} = \frac{0,7 \cdot 0,2}{0,7 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0,6} = 0,44$$

$$p_6 = 1 - p_5 = 1 - 0,44 = 0,56$$

$$p_1 = p(A/F_1F_2) = \frac{p(A)p(F_1/A)p(F_2/A)}{p(A)p(F_1/A)p(F_2/A) + p(\bar{A})p(F_1/\bar{A})p(F_2/\bar{A})}$$

Przy założeniu stacjonarności procesu dwukrotnych badań tego samego modelu możemy przyjąć, że $p(F_2/A) = p(F_1/A)$ oraz: $p(F_2/\bar{A}) = p(F_1/\bar{A})$.
Wówczas

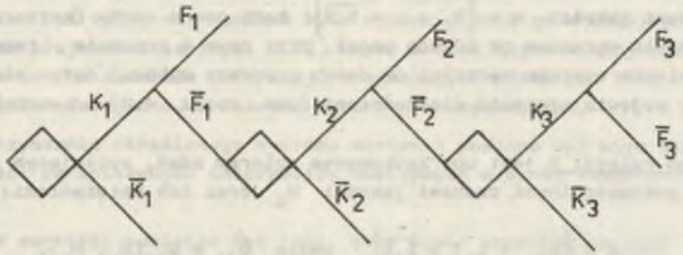
$$p_1 = \frac{0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,8}{0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,8 + 0,3 \cdot 0,4 \cdot 0,4} = \frac{0,448}{0,496} = 0,90$$

$$p(AF_2) = p(A/F_2)p(F_2) = p(F_2/A)p(A)$$

$$p(F_2) = \frac{p(F_2/A)p(A)}{p(A/F_2)} = \frac{0,8 \cdot 0,7}{0,90} = 0,62$$

$$p_7 = p(A/F_1F_2) = \frac{p(A)p(F_1/A)p(\bar{F}_2/A)}{p(A)p(F_1/A)p(\bar{F}_2/A) + p(\bar{A})p(F_1/\bar{A})p(\bar{F}_2/\bar{A})} = 0,61$$

Nieco uogólniając to zadanie można zapytać, ile razy kolejno (w przypadku negatywnych wyników badań $\bar{F}_1$) opłaca się budować nowy model i badać go (K_1), (rys. 4.12). Badanie takiego drzewa (oznaczanie wartości) musi przebiegać od końca (od prawej do lewej, "analiza od tyłu").



Rys. 4.12. Wielokrotnie powtarzany cykl budowy modelu ($K_1, K_2, \ldots$) oraz badań tego modelu ($F_1, F_2, \ldots$)

Oczywiście dane drzewo jest ważne tylko dla sytuacji decyzyjnej PIERWSZEGO etapu. Z chwilą gdy osiągniemy sytuację decyzyjną drugiego etapu, należy najpierw uaktualnić wszystkie dane drugiego i dalszych etapów.

W przypadku procesów unikalnych, niepowtarzalnych, z jakimi ma się do czynienia w procesie projektowania, prawdopodobieństwa są najczęściej prawdopodobieństwami subiektywnymi. Wykazano jednak racjonalność wykorzystania takiej miary niepewności [36], nie opartej na definicji częstościowej, nie mającej przecież w niektórych przypadkach sensu (np. w określonej sytuacji, w określonym czasie tylko jeden raz można zabiegać o kredyty na określony cel).

Jeśli nie można z pewnych względów intuicyjnie określić prawdopodobieństwa, teoria decyzji [45], [58] dostarcza innych kryteriów, np. kryterium MINIMAX-owe, Laplace'a, czy Hurwicza.

5. SYSTEM WARTOŚCI

5.1. System wartości i stawiane mu wymagania

Systemem wartości W nazywać będziemy zbiór pewnych atrybutów (cech) jakości H i układ wzajemnych relacji między nimi B:

$$W = \langle H, B \rangle \tag{5.1}$$

Atrybutami jakości $H = \left\{ H_i : i = \overline{1,I} \right\}$ będą pewne cechy (kryteria) jakości, często wyrażone za pomocą pojęć, przy czym w procesie tworzenia i doskonalenia systemu wartości (w danym procesie wyboru) dąży się do tego, aby pojęcia zastąpić wielkościami (por. rozdz. 4.2) lub nadać im miary.

Układ relacji B jest uporządkowanym zbiorem zdań, opisującym relacje między poszczególnymi cechami jakości H_i oraz ich natężeniami:

$$B = \left\{ b_{ij} : i,j = \overline{1,I} \right\}, \quad \text{gdzie} \quad b_{ij} = b_{ij}(H_i, H_j), \tag{5.2}$$

przy czym często b_{ij} jest zależne od natężenia (wartości) innych cech H_k:

$$b_{ij} = b_{ij}(H_i, H_j, H_k), \qquad k \neq i,j, \tag{5.3}$$

np. projektując odbiornik radiowy możemy żądać dużej czułości wejściowej (H_1), dużej mocy wyjściowej (H_2) i szerokiego pasma częstotliwości wejściowej (H_3), przy czym $H_1 > H_2$ dla dużych wartości H_3 oraz $H_1 < H_2$ dla małych wartości H_3, gdzie relacja $r_{12} = H_1 > H_2$ oznacza, że H_1 jest ważniejsza od H_2.

System wartości ma umożliwić pomiar stopnia, w jakim projektowany obiekt zaspokoi potrzebę.

Pojęcie jakości, ujmowane ilościowo, nie ma uzgodnionej interpretacji. Rozumie się ją między innymi jako "pożądaną cechę wytworu", jako "stopień przydatności do spełnienia swego przeznaczenia". Obszerniejszą dyskusję można znaleźć w pracach: Jurana [29], W. Kilińskiego [32], Wasilewskiego [85], Gasparskiego [19], Borysa [4] i innych.

Możliwość pomiaru jakości kwestionowana jest przez wielu badaczy. Stwierdzają oni, że jakość jest wielkością wektorową i nie może być mierzona skalarnie. Uznając ich argumenty należy stwierdzić, że istnieje problem praktyczny ilościowej oceny jakości - ważny i częsty, występujący niemal w każdym procesie projektowania. Problem ten musi być w każdym przypadku rozwiązywany niezależnie od zastrzeżeń teoretycznych. Obowiązkiem nauki jest zmniejszenie arbitralności i uczynienie wyboru działaniem o dużym stopniu racjonalności.

Systemowi wartości dla danego zadania Z można postawić następujące wymagania:

- powinien być zgodny z systemem wartości dla "nadzadania" Z_o (patrz rys. 5.1) w tym sensie, że wzrost jakości projektowanego obiektu powoduje lepszą jakość układu, do którego on należy;
- powinien umożliwiać ocenę stopnia wypełniania potrzeby przez projektowany obiekt, czyli pomiar jakości tago obiektu;
- powinien być taki, aby możliwe było wykorzystanie go w kolejnych fazach procesu projektowania (rys. 2.2), nawet w tych najwcześniejszych, kiedy projektant ma niewiele informacji o ocenianych obiektach i są ona często mało wiarygodne, a ważność wyboru jest największa.

(Wykorzystanie określonego systemu wartości powinno być więc możliwe przy znajomości ograniczonych informacji, dostępnych w danej fazie projektowania);

- system wartości powinien być taki, żeby wybór dokonany na jego podstawie był jednoznaczny, tzn. powinien umożliwiać pomiar jakości danych wariantów z dostateczną dokładnością (po to, aby rozróżnić warianty), w sposób stabilny (niezależny od osoby przeprowadzającej ocenę wariantów);
- określony system wartości może być ważny tylko w danym zadaniu wyboru.

Każdemu atrybutowi jakości H_i przypisać trzeba pewną funkcję preferencji f_i, której argumentem jest natężenie tego atrybutu (lub jego wartości, gdy jest mierzalny): $f_i(H_i)$; np. dla $H_i' < H_i''$ zapis: $f_i(H_i') > f_i(H_i'')$ oznacza, że mniejsze natężenie cechy H_i jest preferowane przed większym. W roli funkcji preferencji może wystąpić pewne uogólniona funkcja kosztów lub funkcja przynależności lub pewna dyskretna ocena punktowa lub podobne. Wydaje się, że najogólniejszą i racjonalną jej miarą może być funkcja użyteczności zaproponowana w psychologicznej teorii decyzji w 1944 r. przez J. Neumenne i O. Morgensterna [36]:

$$U(H_i) : \left[H_{i\,min}, H_{i\,max} \right] \rightarrow \left[0,1 \right]$$

Jej wykorzystanie jest konsekwencją faktu zaakceptowania akejomatów użyteczności [36, s. 98], a w szczególności aksjomatów: spójności, przechodniości i podstawialności.

Przyjmiemy także, że prawdopodobieństwo subiektywne p_s (wykorzystywane dla zadań pojedynczych, niepowtarzalnych) jakiegoś zdarzenie przy-

szłego będzie równie racjonalną miarą jak prawdopodobieństwo oparte na definicji częstości zdarzeń.

Przez doskonalenie systemu wartości rozumie się tu wysiłki zmierzające do zmniejszenia subiektywności miary wartości wariantów i polepszenia stopnia adekwatności tej miary do istoty potrzeby, która ma zostać zaspokojona w danym procesie projektowania.

Na początku procesu projektowania (w ramach danego zadania, czyli w pierwszych działaniach mikrostruktury - rys. 2.5) system wartości W jest najczęściej dany w postaci opisowej, nieprecyzyjnej: cechy H_i są niezdefiniowanymi pojęciami (np. wygoda użytkowania, funkcjonalność techniczna, nowoczesność). Rozmyte są także relacje (np. lepszy, bardziej istotny, pomijalny). Najczęściej system wartości jest niekompletny, tzn. brak niektórych cech i niektórych relacji. Bywa także, że na początku system wartości dany jest częściowo niejawnie, np. przez odwołanie się do istniejących tradycji w danej dziedzinie techniki: "preferowane będzie rozwiązanie nowatorskie" albo: "należy dążyć do jak najlepszej zgodności postaci i funkcji obiektu, forma estetyczna jest mniej ważna".

Przez tworzenie (doskonalenie) systemu wartości rozumiemy proces definiowania i formalizowania cech H_i oraz relacji B tak, aby ów system mógł być praktycznie wykorzystany w procesie wyboru, np. w procesie optymalizacji matematycznej. Określanie systemu wartości w procesie projektowania jest sprawą kluczową, gdyż od niego zależę (powinny zależeć) wybór i decyzja w każdym zadaniu składającym się na ten proces, a więc w każdej fazie makrostruktury i po zakończeniu każdego cyklu działań opisanych mikrostrukturą.

Pomimo że formalna optymalizacja przeprowadzana jest dość rzadko (ze względu na brak dostatecznie adekwatnych modeli matematycznych obiektów oraz trudności obliczeniowe), to jednak system wartości powinien być sformułowany w sposób jawny, jednoznaczny w każdym przypadku, ponieważ projektant zawsze dąży do tego, aby każda jego decyzja była najlepsza i stara się to robić co najmniej intuicyjnie. Racjonalność takiego postępowania weryfikuje praktyka: w wielu przypadkach formalna optymalizacja potwierdza wcześniejsze decyzje, podjęte intuicyjnie.

Z drugiej strony, dla wielu dziedzin techniki, metody analizy i syntezy konstrukcji osiągnęły w ostatnich latach wysoki poziom: opracowano formalne algorytmy matematyczne lub procedury empiryczne, dzięki czemu możliwa stała się optymalizacja konstrukcji. Nakazem chwili jest zatem zaproponowanie metody poszukiwania kryteriów.

Należy podkreślić, że w wielu publikowanych pracach poświęconych optymalizacji kryterium optymalizacji przyjmuje się arbitralnie, bez należytej dyskusji, a czasem można odnieść wrażenie, że nawet dowolnie. A nie trzeba dowodzić, że konstrukcja optymalna według dowolnego kryterium nie jest lepsza niż jakakolwiek inna konstrukcja poprawna. W takich przypadkach trud optymalizacji jest daremny. Można powiedzieć nawet, że konstrukcja, która

nie jest rezultatem optymalizacji ze względu na właściwe kryterium, jest lepsza od optymalnej ze względu na dowolne kryterium, gdyż istnieje szansa, że zostanie jeszcze w przyszłości poddana zabiegom optymalizacyjnym lub że zostanie zoptymalizowana intuicyjnie. Matematyczna optymalizacja zamyka drogę intuicji.

System wartości winien być sformułowany jednoznacznie nawet w najwcześniejszych fazach struktury pionowej, kiedy posiadamy niewiele i mało wiarygodnych informacji o ocenianych i wybieranych wariantach, a ważność zadania wyboru jest największa.

Postulat jednoznaczności wyboru będzie spełniony wtedy, kiedy wybór przeprowadzony będzie w oparciu o jedno tylko kryterium wyboru i to jednoznacznie zdefiniowane.

Zarówno potrzeba, jak i ograniczenia są zawsze wielostronne, często nieokreślone, niezdefiniowane lub niemierzalne. Ta nieokreśloność może być spowodowana niedostatecznym rozpoznaniem, losowością i rozmytością wymagań i rozwiązań (patrz p. 3.4) albo tym, że projektowany wytwór będzie należał jednocześnie do kilku różnych układów. Obowiązkiem projektanta jest rozwikłać tę niejasną sytuację - jednoznacznie sformułować potrzebę i opisać ją ilościowo. System wartości jest pewną transformacją ilościowego opisu potrzeby.

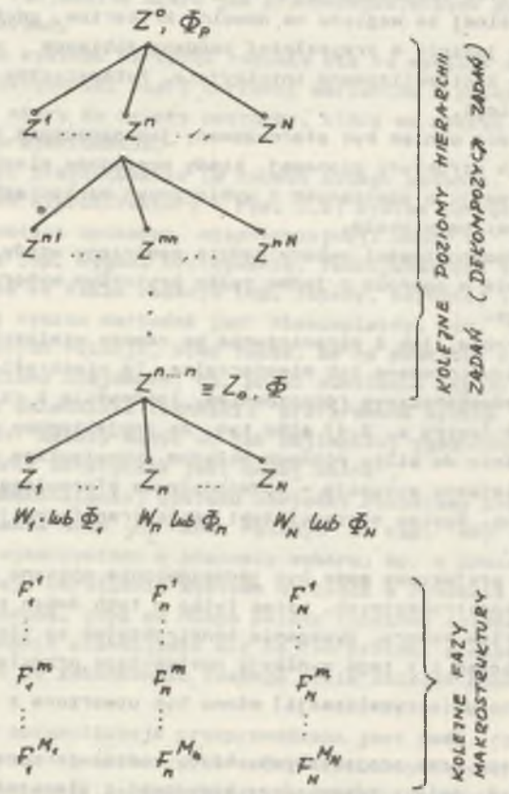
Rozwiązanie projektowe może być jednoznacznie opisane za pomocą cech i właściwości konstrukcyjnych, zatem tylko w tych dwóch zbiorach można poszukiwać kryteriów wyboru. Wymagania konstrukcyjne są ilościowym opisem potrzeby i ograniczeń i z tego wynikają następujące przesłanki:

- kryterium wyboru (optymalizacji) winno być utworzone z wymagań konstrukcyjnych,
- w miarę postępu prac projektowych, kiedy następuje coraz lepsze rozpoznanie wymagań, należy odpowiednio korygować i ulepszać kryterium wyboru.

Szukamy takiej wielkości naturalnej lub sztucznej, jednostkowej lub złożonej (syntetycznej), która osiąga wartość ekstremalną, gdy rozwiązanie jest uznane za najlepsze i tę wielkość nazywamy <u>kryterium optymalizacji</u>. Odpowiedź na pytanie, które rozwiązanie jest najlepsze, można znaleźć wyłącznie na gruncie badania zadania, które jest rozwiązywane i jego nadsystemu.

5.2. <u>Układ kryteriów</u>

Rozpoczynając projektowanie, tzn. rozwiązując zadanie projektowe Z_n (rys. 5.1), projektant powinien ustalić system wartości W_n dla tego zadania. Aby to uczynić, powinien zdać sobie sprawę, że zadanie Z_n jest częścią większego zadania Z_o, powstałą w wyniku dekompozycji tego ostatniego (por. p.2.4), dla którego obowiązuje inny system wartości W_o.



Rys. 5.1. Hierarchia zadań $Z^0,\ldots,Z^n,\ldots,Z^{n\ldots n}$, hierarchia kryteriów $\Phi_p \ldots \Phi_n$ i przekształcanie kryteriów : $\Phi_n,\ldots,F_n^m,\ldots,F_n^{M_n}$: Z_i - zadanie ($Z_i = <WE_i, WY_i, \Omega_i, \Phi_i>$ lub $< WE_i, WY_i, \Omega_i, \Phi_i >$), Z^0 - zadanie projektowe dotyczące obiektu typu A, Φ_p - kryterium pierwotne, Φ_n - kryterium nadrzędne dla zadania Z_n, F_n^m - zadaniowe kryterium optymalizacji zadania Z_n w m-tej fazie makrostruktury procesu projektowania

Jeśli ten system W_n nie jest dany lub budzi wątpliwości, projektant powinien sam go utworzyć, dekomponując system wartości W_o zadania Z_o wyższego szczebla hierarchii. Jeśli i ten system nie jest dany w sposób jawny, co niestety jest częstym przypadkiem, projektant powinien posuwać się "w górę" drzewa zadań (rys. 5.1) tak długo, aż dojdzie do zadania (przedmiotu projektowania) Z^0 typu A (rozdz. 5.3), tzn. bezpośrednio zaspokajającego potrzeby społeczne.

Dla takiego obiektu można przyjąć, że kryterium optymalizacji powinna być suma wszystkich kosztów (patrz p. 5.3). Nazywać je będziemy pierwotnym kryterium optymalizacji Φ_p. Kryterium to jest rozmytą miarą systemu wartości W.

Projektant (konstruktor) w miarę postępowania procesu projektowania rozwiązuje szereg zadań o bardzo różnym stopniu ogólności w stosunku do projektowanego obiektu oraz przy różnym stopniu znajomości obiektu i warunków. W każdym przypadku musi on mieć konkretne i adekwatne do danego zadania kryterium optymalizacji, podlegające stałemu procesowi uszczegółowienia i ulepszania. Takie kryterium nazwiemy zadaniowym kryterium optymalizacji F. Powinno ono zawsze wynikać z pierwotnego kryterium optymalizacji Φ_p. Zadaniowe kryterium optymalizacji jest ważne tylko w określonej, m-tej fazie procesu projektowania.

Ze względów praktycznych i ekonomicznych nie byłoby wygodne i racjonalne, gdyby projektant za każdym razem - nawet przy niezbyt ważnych zadaniach elementarnych - musiał odwoływać się do kryterium pierwotnego i analizować społeczne wymagania nadsystemu (np. trudno określić, jaki jest związek między poszukiwanym kryterium optymalizacji projektowanego wzmacniacza a polityką społeczną państwa).

Dlatego proponuje się wprowadzić pojęcie nadrzędnego kryterium optymalizacji Φ, będącego niezmiennikiem danego procesu projektowania, tzn. ważnego dla wszystkich zadań danego procesu projektowania. Kryterium to ustalane jest na podstawie badania wymagań konstrukcyjnych, nałożonych na projektowany wytwór i jest zgodne z kryterium pierwotnym Φ_p, będąc jego transformacją.

Przykład. Projektowany jest miernik poziomu wody (zadanie Z_n), będący częścią systemu zdalnego zbierania informacji o stanie wód dorzecza pewnej rzeki (nadzadanie Z_o). Proces projektowania danego obiektu (miernika) jest w fazie projektowania koncepcyjnego (faza pierwsza - projektowanie studialne). Zadanie wyboru dotyczy koncepcji miernika. Jako pierwotne kryterium Φ_p dla całego systemu przyjęto całkowity koszt budowy i eksploatacji systemu. Wyprowadzono stąd kryterium nadrzędne Φ_n dla miernika: niezawodność.

W fazie projektowania koncepcyjnego nie jesteśmy w stanie ilościowo ocenić niezawodności poszczególnych wariantów koncpecji miernika, przyjęto więc następujący zbiór kryteriów oceny K, opisujący tę niezawodność: liczba części ruchomych miernika (K_1), zużycie energii (K_2), względna stałość charakterystyk użytych elementów w funkcji czasu i w funkcji różnych zakłóceń zewnętrznych (K_3). Z tych kryteriów zostanie utworzone zadaniowe skalarne kryterium optymalizacji $F = F(k_1, k_2, k_3)$.

Proces przetwarzania systemu wartości i formułowania coraz bardziej szczegółowych kryteriów optymalizacji Φ_p do Φ_n na początku procesu projektowania, a potem formułowanie kolejnych postaci kryterium zadaniowego F_n^1 do $F_n^{M_n}$ w poszczególnych fazach struktury pionowej makrostruktury procesu jest działaniem ściśle heurystycznym, trudnym i bardzo odpowiedzialnym.

5.3. Pierwotne kryterium optymalizacji ϕ_p [65]

Mamy tu odpowiedzieć na pytanie, jaką konstrukcję w danych warunkach uznajemy za najlepszą, czyli optymalną lub inaczej, którą właściwość (lub cechę) spośród ogółu właściwości i cech konstrukcyjnych, rozwiązanie najlepsze ma ekstremalną? Istnieje wiele różnych propozycji co do wielkości, która mogłaby być przyjęta jako uniwersalne kryterium optymalizacji,są to np.: zysk, różnie pojmowana efektywność techniczno-ekonomiczna, użyteczność społeczna, niezawodność społeczna, stopień wypełnienia życzeń użytkownika, niezawodność, stopień w jakim dany wytwór przyczynia się do postępu społecznego i wiele innych wielkości o różnym stopniu ścisłości zdefiniowania i najczęściej bardzo trudnych do wyznaczenia ilościowego,szczególnie na wczesnych etapach procesu projektowania[x].

Zbadajmy relacje projektowanych wytworów do ich nadsystemu, czyli do systemu zaspokajania potrzeb społecznych.

Przedmiot projektowania ma zaspokoić określoną potrzebę społeczną w określonych warunkach, ma to robić jak najlepiej i ma być przystosowany do tych warunków.

Ze względu na stosunek do procesu zaspokajania potrzeb społecznych projektowane obiekty możemy podzielić na dwie grupy:

typ A - przeznaczone dla bezpośredniego indywidualnego użytkownika lub do konsumpcji zbiorowej (potrzeby kulturalne, obrona kraju itp.),

typ B - przeznaczone dla celów przemysłowych, wojskowych i innych, będące składnikami tych pierwszych.

Obiekty typu B nie zaspokajają zatem potrzeb społecznych bezpośrednio, lecz tylko pośrednio dzięki temu, że przyczyniają się do wytworzenia obiektów typu A. Wynika stąd pierwszy wniosek: kryterium optymalizacji dla obiektów typu A musi wynikać z ich przydatności społecznej, a dla obiektów typu B wynika z kryterium dla obiektu typu A, do którego należy oraz z relacji do innych składników tego obiektu typu A.

Przedyskutujemy teraz, jakie winno być to kryterium dla obiektów typu A.

Każdy wytwór należy do (jest elementem) wielu różnych obiektów (systemów) jednocześnie. Na przykład droga należy i do systemu komunikacji wielu różnych ludzi i instytucji, i do systemu melioracji pól (jeśli równolegle biegną rowy), i do systemu łączności (jeśli obok zainstalowano linię telefoniczną), i do systemu obrony państwa, do systemu geodezyjnego, do krajobrazu itd. Każdy system narzuca danemu obiektowi swoje różne wymagania, najczęściej sprzeczne. Dlatego nie może on być optymalny ze względu na wymagania wszystkich systemów (do których należy) jednocześnie, bez względu na przyjęte kryteria optymalizacji.

[x] Porównaj np.: Zieleniewski [98] Rudniański [55], Dietrych [12], Wasiutyński [86], Gasparski [20], [22], Dąbrowski [10], Dorosiński [13], Toffler [82], Tarnowski [65], Bojarski [3].

Pozostaje więc albo znaleźć pewien kompromis na drodze intuicyjnej,albo znaleźć taki nadsystem, do którego należą wszystkie systemy, o których wspomniano powyżej i dla niego znaleźć adekwatne kryterium optymalizacji. Ta druga droga wydaje się bardziej racjonalna ze względu na możliwość bardziej obiektywnego i ścisłego postępowania.

Takim nadsystemem jest społeczeństwo z jego potrzebami, przy czym przy obecnym stopniu integracji i współzależności państw wszystkich kontynentów należy brać pod uwagę nie jeden naród lecz całą ludzkość.

Jakie są zatem kryteria optymalizacji w takim nadsystemie? Jakie są cele i zadania społeczeństwa? Odpowiedzi należy szukać w kategoriach etycznych. Bezpośrednio z nich powinny wynikać cele polityczne i gospodarcze.

Społeczeństwo produkuje pewną ograniczoną masę dóbr i usług,przeznaczoną do konsumpcji, częściowo indywidualnej, częściowo zbiorowej. Decyzja: co? jakie? i ile? ma być produkowane jest decyzją polityczną i powinna być funkcją celów, jakie społeczeństwo sobie stawia.

Każdy człowiek społeczeństwa ma różnorakie potrzeby i chce je wszystkie jak najlepiej zaspokoić. Ponieważ nie jest to osiągalne,chce mieć swobodny wybór: szuka kompromisu między ilością i jakością zaspokojonych potrzeb. Dla różnych ludzi potrzeby te są różne, zarówno co do rodzaju, jak i ilości i jakości. Z drugiej strony społeczeństwo jako producent oferuje swoim członkom możliwości zaspokojenia różnych potrzeb, jednak nie wszystkich naraz. Zadaniem społecznym jest więc wytworzenie i dystrybucja odpowiednich dóbr, ale także świadome kształtowanie indywidualnych potrzeb. Jest to źródło konfliktów między jednostką a społeczeństwem, a także między poszczególnymi ludźmi.

W warunkach gospodarki towarowej narzędziem obywatela, za pomocą którego może on manifestować i dokonywać wyboru - które potrzeby i na jakim poziomie jakości mają być zaspokojone - jest porównanie ich cen oraz kosztów eksploatacji i kasacji z dochodami tego obywatela.

Zadaniem politycznym jest pogodzenie interesów społecznych z interesami indywidualnymi, tzn. stworzenie takiej sytuacji, aby decyzje indywidualne i społeczne oraz wywołane nimi działania były wzajemnie zgodne.

Stawiamy tezę, że ponieważ środkiem wymiany jest pieniądz,najlepsza sytuacja powstanie wówczas, gdy koszt zaspokojenia potrzeby będzie najmniejszy. Konsument będzie wówczas mógł zaspokoić największą możliwą ilość swoich potrzeb. Jednocześnie producent powinien oferować wytwory i usługi różnej jakości i odpowiednio po różnych cenach, aby umożliwiać optymalny wybór indywidualnemu konsumentowi.

Powszechnie uważa się, że nie wszystko da się ocenić w pieniądzach,np. wartość zabytków (choć bywają one wyceniane w jednostkach monetarnych), cierpienie i zdrowie oraz życie ludzkie (choć określa się odpowiednie stawki ubezpieczeniowe dla celów odszkodowań), krajobraz (można oszacować koszt odbudowania). Można spotkać opinię, że do takich wielkości należy również czas. Wydaje się jednak, że jeśli nie chodzi o czas człowieka w

sensie np. bezpowrotnie utraconych możliwości przeżycia czegoś, to nie jest to słuszne mniemanie. Ekonomiści znają przecież wartość czasu.

W pewnych warunkach limitowanych dostaw (np. na wojnie lub w przypadkach klęski żywiołowej) pewne przedmioty mogą się też wydawać bezcenne, ale jest to tylko pozorne. Na przykład gaśnica pianowa, której cena nominalna wynosi np. 10.000 zł, na początku pożaru warta jest tyle, ile wynoszą straty wywołane pożarem, może nawet miliony złotych,ale nie jest bezcenna.

Powyżej była mowa o kosztach - mamy tu na myśli całkowity koszt wynikający z projektowania, wytwarzania, eksploatacji i kasacji wytworu, przy czym należy uwzględnić nie tylko koszty bezpośrednie ale również wszystkie pośrednie, np. dewastacji środowiska, zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia człowieka itd.

Możemy więc sformułować następujący wniosek: pierwotnym kryterium optymalizacji środków technicznych typu A powinien być ich koszt całkowity: bezpośredni i pośredni[x)].

Powyżej przedyskutowano sprawę pierwotnego kryterium optymalizacji dla obiektów typu A. Najczęściej jednak projektant, czy konstruktor ma do czynienia z obiektami typu B.

Każdy obiekt typu A składa się z wielu różnych części, które są wtedy obiektami typu B i powiązany jest z nimi wieloma różnorakimi więzami zależności. W ogólnym przypadku nie jest prawdziwe twierdzenie,że optymalny system składa się z optymalnych podsystemów, optymalizowanych ze względu na to samo kryterium. Na przykład najlżejszy silnik nie składa się z najlżejszego bloku, najlżejszego korbowodu, przeciwciężaru itd. Dlatego dla obiektów typu B należy znaleźć inne kryterium optymalizacji. Aby je odnaleźć, należy podzielić system typu A na podsystemy typu B, odnaleźć odpowiednie związki między ich właściwościami i na tej podstawie określić kryterium dla projektowanego obiektu typu B. Na przykład projektujemy gaźnik samochodu osobowego. Gaźnik jest częścią składową silnika, ten z kolei wchodzi w skład samochodu. Samochód przyjmujemy jako obiekt typu A i jako kryterium pierwotne optymalizacji samochodu przyjmujemy jego koszt całkowity. Pytamy - badając wzajemne powiązania - jaki powinien być gaźnik, aby samochód był najtańszy (w sensie kosztów całkowitych) i odpowiedni zbiór wielkości, np. niezawodność i sprawność przyjmujemy jako pierwotne kryterium optymalizacji gaźnika,nie precyzując bliżej formalnie tego kryterium.

x) W pracy [65] wykazano, że takie kryterium kosztowe jest szczególnym przypadkiem kryterium efektywności techniczno-ekonomicznej (Zieleniewski [98]), przy czym wydaje się o tyle skuteczniejsze,że użytkownik nie szuka na ogół najwyższej jakości, lecz odpowiedniej do potrzeb jakości technicznej przy najniższych kosztach całk. ltych.

W każdym przypadku kryterium pierwotne obiektu niższego szczebla powinien ustalać projektant obiektu wyższego szczebla w hierarchii wielkości i współzależności tych obiektów. Ustala się w ten sposób odpowiednią hierarchię kryteriów.

Na zakończenie sprawdźmy intuicyjnie skuteczność kryterium kosztowego w trzech typowych sytuacjach projektowych:

1) projektant (w imieniu producenta) wybiera cechy obiektu typu A w celu produkcji,

2) projektant (konstruktor) wybiera cechy obiektu typu B w celu produkcji (lub zakupu do celów produkcyjnych),

3) użytkownik wybiera cechy obiektu typu A w celu zakupu.

ad 1 - prawdopodobnie kryterium wyboru będzie koszt całkowity,

ad 2 - kryterium wynika z przekształcenia kryteriów w hierarchicznym postępowaniu optymalizacyjnym,

ad 3 - prawdopodobnie kryterium będzie sumą użyteczności (zawierających koszty) wielu wytworów, których użytkownik jednocześnie potrzebuje. Interesująca jest sytuacja, gdy użytkownik ma do wyboru dwa podobne wytwory spełniające te same potrzeby, za tę samą cenę.Decydujące będą wówczas koszty eksploatacji.

Na zakończenie trzeba przyznać, że dobór kryterium pierwotnego jest sprawą niezwykle złożoną i dyskusyjną, wkraczającą w problemy polityki, ekonomii, socjologii, filozofii, kultury itd. Sprawom tym poświęca się współcześnie wiele uwagi.

5.4. Nadrzędne kryterium optymalizacji

Jest to kryterium obowiązujące we wszystkich fazach makrostruktury danego procesu projektowania, jest niezmiennikiem danego procesu. W miarę dopływu informacji o projektowanym obiekcie kryterium to może być lepiej precyzowane, np. "łatwość obsługi" w fazie koncepcyjnej, może być sformułowane jako "koszt obsługi" w fazie projektu roboczego.

Jeśli przedmiotem projektowania jest obiekt typu A (por. p. 5.3), jego kryterium pierwotne ϕ_p jest z definicji równe kryterium ϕ. W pozostałych przypadkach, gdy przedmiotem projektowania jest część obiektu typu A, kryterium nadrzędne powinno być wyprowadzane z kryterium pierwotnego tak, aby było z nim zgodne w tym sensie, że poprawa ϕ dla projektowanego obiektu oznacza poprawę ϕ_p dla nadsystemu. Jednocześnie nie wymaga się, aby było jednoznacznie ("ostro") zdefiniowane.

Nie ma ogólnych metod postępowania w tym zakresie. Jeśli odpowiednie związki są znane i matematycznie sformułowane, można posłużyć się metodami optymalizacji wielopoziomowej [42]. W pozostałych przypadkach należy odwołać się do intuicji, posługując się metodami heurystycznymi.

Kryterium nadrzędne ϕ jest ustalane przez projektanta nadsystemu, przy udziale projektanta - wykonawcy danego zadania. Jeśli ϕ jest jednoznacznie określone w kategoriach zmiennych fizycznych i ekonomicznych, i jeśli może być ilościowo wyznaczone w danej fazie makrostruktury, staje się zadaniowym kryterium optymalizacji: $F = \phi$, np. koszt, czy ciężar obiektu.

W niektórych dziedzinach techniki istnieją - potwierdzone praktyką - tradycje co do tego kryterium, np. w budownictwie - ciężar elementów, w elektronice - moc rozpraszana, w mechanice precyzyjnej - liczba ruchomych elementów i wymagana ogólna dokładność wykonania.

Dla urządzeń automatyki i informatyki podczas ich projektowania kryterium nadrzędnym może być niezawodność, dokładność, szybkość działania, zużycie energii itp.

W budowie maszyn, w szczególności w zadaniach konstrukcyjnych (tzn. gdy chodzi o określenie wartości cech konstrukcyjnych, czyli postaci konstrukcji i wymiarów), mogą być pomocne różne heurystyczne zasady konstrukcyjne, np. znane 4 zasady konstrukcji [11]: 1) optymalnego obciążenia, 2) optymalnego tworzywa, 3) optymalnej stateczności, 4) optymalnych stosunków wielkości związanych.

W konkretnym przypadku z tych zasad ogólnych może wyniknąć określone brzmienie kryterium optymalizacji lub przynajmniej niektóre kryterium oceny. Na przykład w przypadku wydrążonego wału pracującego na skręcanie z zasady optymalnego obciążenia wynika kryterium $k = D/d = min!$ $(k > 1)$, gdzie D i d są średnicą zewnętrzną i średnicą wewnętrzną wału.

5.5. Zadaniowe kryterium optymalizacji F [74], [75], [78]

5.5.1. Cel, założenia

Aby rezultat wyboru był jednoznaczny, należy ustalić jednoznaczne skalarne kryterium wyboru (kryterium optymalizacji). Przyjmujemy, że da się określić takie kryterium. Jeśli nie jest to możliwe, mamy przypadek poli-optymalizacji (patrz p. 6.1).

Przyjmijmy następujące założenia:

1. Dane jest nadrzędne kryterium optymalizacji ϕ (p. 5.4), tzn. pewna wielkość lub zbiór wielkości, niekoniecznie zdefiniowanych (np. wygoda użytkowania połączona z atrakcyjnym wyglądem zewnętrznym), które w sposób formalny lub tylko heurystyczny stanowią o jakości elementów d w danym zbiorze D.

2. Dany jest ograniczony zbiór wariantów (alternatyw, wersji) D, skończony lub o mocy continuum, w przestrzeni zmiennych decyzyjnych X, D^*.

3. Jest dany (lub istnieje możliwość określenia) pewien zbiór kryteriów oceny $K = \{K_i : i = \overline{1,I}\}$ (p. 4.2) takich, że:

a) są możliwe do ilościowego określenia ich wartości dla poszczególnych rozwiązań d: albo w sposób deterministyczny: k_{iv}, albo losowy: $f(k_{iv}) = f_{iv}$, albo losowy uzależniający rozkład prawdopodobieństwa od losowych stanów otoczenia S^t: $f_{iv}(S^t)$, rozdz. 4.4, albo rozmyty: P_{ij} rozdział 4.3;

b) charakteryzują wszystkie dane warianty d ze względu na kryterium nadrzędne ϕ w sposób adekwatny do przyjętego systemu wartości W;

c) są wzajemnie niezależne.

→. Istnieje dostęp do kompetentnych respondentów (ekspertów).

5. W danym zadaniu mamy tylko określoną informację o zbiorze obiektów, o wymaganiach, o ograniczeniach i zdobywanie nowej lub dokładniejszej informacji jest albo niemożliwe, albo kosztowne.

Przy powyższych założeniach należy znaleźć taką funkcję skalarną $F(k_1,\ldots,k_i,\ldots,k_I)$, określoną na zbiorze D, która by mogła być miarą jakości kolejnych wariantów $d \in D$, uwzględniającą losowy charakter ocen $k_i(d)$. Miara ta, zwana dalej zadaniowym kryterium optymalizacji F, powinna spełnić następujące wymagania:

a) powinna umożliwić jednoznaczne uszeregowanie poszczególnych wariantów d według wartości nadrzędnego kryterium optymalizacji ϕ (czy "natężenia" ϕ, jeśli nie ma ono definicji),

b) powinna zależeć od skończonej liczby kryteriów k_i, $i = \overline{1,I}$,

c) nie musi mieć interpretacji fizycznej ani ekonometrycznej,

d) ma być ważna tylko w danym zadaniu wyboru.

Założenie 1 daje podstawę do wyróżnienia dwóch przypadków:

a) nadrzędne kryterium optymalizacji ϕ ma jednoznaczną interpretację fizyczną lub ekonometryczną, czyli dana jest funkcja

$$\phi = \phi(y_1, y_2, \ldots, y_z, \ldots, y_Z), \tag{5.4}$$

np. "moc silnika z jednostki jego masy: $\phi = \frac{\text{moc } [kW]}{\text{masa } [kg]}$",

b) nie można określić związku (5.4) albo dlatego, że ϕ jest niejednoznacznie sformułowane (rozmyte), np. "efektywność techniczno-ekonomiczna", albo dlatego, że w danej fazie projektowania znajomość obiektu projektowania jest zbyt mała, np. "niezawodność" podczas projektowania koncepcyjnego.

W pierwszym przypadku kryterium nadrzędne ϕ może być wprost wykorzystane jako zadaniowe kryterium optymalizacji F, pod warunkiem, że można znaleźć wszystkie związki (4.2):

$$\{y_z = f_z(x_1,\ldots,x_p) : z = \overline{1,Z}\} \tag{5.5}$$

tak, aby można było obliczać wartość F dla każdego punktu przestrzeni zmiennych decyzyjnych

$$F = F(x_1,\dots,x_p) \tag{5.6}$$

Kryterium skalarne jest sposobem ilościowego określania jakości za pomocą jednej liczby. Uzyskuje się to przez przyjęcie wspólnej skali dla wszystkich kryteriów oceny K_i: skali użyteczności, skali pieniężnej lub innej, np. tak jak w metodzie punktowej, albo jak w metodzie cieni [41] lub operowanie miarami względnymi, np. tak, jak w metodzie średniego osiągu [66].

Model matematyczny zadaniowego kryterium optymalizacji F może zostać znaleziony na gruncie badań statystycznych, fizykalnych lub intuicyjnie. Należy wyznaczyć ten model. Jest to zagadnienie klasyczne,któremu poświęcono wiele prac. Pamiętając, że F ma być miarą jakości, należy rozstrzygnąć, czy F ma być sformalizowaniem rzeczywistych preferencji ludzi,czy też ma być <u>normą</u> wynikającą z postulatów racjonalności.Uwzględniając pierwotne cele projektowania (rozdz. 2.1) należy przyjąć drugie sformułowanie.

5.5.2. Wybór postaci kryterium zadaniowego F

Funkcja F nie istnieje obiektywnie w przyrodzie (być może z wyjątkiem nieznanych nam kryteriów genetycznej eliminacji w procesie dziedziczenia cech i ewolucji). Istnieje natomiast intuicyjnie w świadomości lub podświadomości ludzi, którzy ciągle są zmuszani dokonywać życiowych wyborów i podejmować decyzje. Kryteria te u ludzi są silnie zróżnicowane i zmienne w czasie. Badanie ludzi pod tym względem jest domeną psychologicznej teorii decyzji i prowadzi do modeli opisowych (por. np. [40]),zwanych w tej teorii strategiami podejmowania decyzji.

Istnieje wiele możliwych postaci funkcji F. Badania psychologiczne doprowadziły jednak do wyróżnienia tylko trzech strategii [36] , [40] :

- postać liniowa (kompensacyjna):

$$F = \sum_{i=1}^{I} w_i k_i \tag{5.7}$$

charakteryzuje się tym, że niedostatek jednej właściwości K_i może być skompensowany odpowiednio większym (korzystniejszym) natężaniem innej właściwości K_j,

- postać koniunkcyjna, opisana funkcją paraboliczną:

$$F = \prod_{i=1}^{I} k_i^{\alpha_i} \tag{5.8}$$

Funkcja F osiąga maksimum, gdy wartości k_i są duże i wyrównane,czyli gdy obiekt jest wszechstronnie zadowalający. Nagradza więc przeciętną uniwersalność (wszechstronność) rozwiązań.

Strategia koniunkcyjna ma drugą własność taką, że jeśli w formule (5.8) zamiast k_i podstawić k_i' takie, że

$$k_i' = \begin{cases} 0, & \text{gdy } k_i^* = \dfrac{k_i - a_i}{b_i - a_i} < 0 \\ 1, & \text{gdy inaczej} \end{cases} \tag{5.9}$$

to takie kryterium ma właściwości selekcyjne - przyjmuje wartość zero, gdy choćby jedno z kryteriów nie przekroczy wartości progowej a_i,

- postać alternatywna:

$$F = \prod_{i=1}^{I} \left(\frac{1}{a_i - k_i}\right)^{\alpha_i} \tag{5.10}$$

opisuje postępowanie decydenta, który najpierw określa odpowiednie progowe (ale dość wysokie) natężenia a_i kryteriów oceny k_i, a następnie wybiera tę wersję rozwiązania, która cechuje się wysokim natężeniem przynajmniej jednego kryterium. Jest to strategia nieliniowa i niekompensacyjna.

Oprócz wymienionych istnieje grupa strategii interakcyjnych (konfiguracyjnych), zakładających wzajemne zależności między kryteriami oceny K_i. W pracach z zakresu nauk inżynierskich (np. metody optymalizacji wielokryterialnej [27] , inżynieria jakości [33] , [34] , metodologia projektowania [58] , [54] , [89] , [12] , [25] i inne), w pracach z zakresu ekonometrii i badań operacyjnych stosuje się w olbrzymiej większości model liniowy (addytywny), rzadziej koniunkcyjny (iloczynowy) [24] , [58] , [84] .

Należy przyznać, że istnieją poważne zastrzeżenia co do tego ujęcia.Jones [28, s. 405] zauważa, że nie zawsze prawdziwe jest założenie, że ważność celów nie zmienia się w zależności od cech rozwiązań. Wise [91,s.12] zwraca uwagę na fakt, że często nie jest spełniony warunek niezależności kryteriów (patrz p. 5.2), a także, że trudno uzyskać miarodajne opinie o ważności poszczególnych kryteriów, ponieważ ich liczba jest zwykle dość duża.

Ograniczmy się więc do dwu najprostszych modeli:

addytywnego

$$F = \sum_{i=1}^{I} \varphi_i(k_i) \tag{5.11}$$

i koniunkcyjnego (multiplikatywnego)

$$F = \prod_{i=1}^{I} \varphi_i(k_i), \tag{5.12}$$

ponieważ:

- brak przesłanek, które by nakazywały preferowanie jakiejkolwiek innej formy, z wyjątkiem bardzo specjalnych i zbadanych przypadków (patrz np. [36] i [40]), przyjmujemy więc formę najprostszą,
- zgodnie z założeniami (p. 5.5.1) argumenty k_i (kryteria oceny) są niezależne,
- formę addytywną możemy traktować jako liniową aproksymację, tym dokładniejszą, im mniejszy jest rozrzut wartości k_{iv} danego kryterium oceny k_i dla całego zbioru D, czyli im mniejsze są przedziały $[a_i, b_i]$.

Funkcje φ_i można interpretować jako funkcje czułości: $\varphi_i = \frac{\partial \phi}{\partial k_i}$, jeśli ϕ ma postać analityczną.

Przyjmijmy dalej, że kolejnych funkcji φ_i będziemy poszukiwać w postaci:

$$\varphi_i(k_i) = w_i u_i(k_i), \tag{5.13}$$

gdzie w_i jest współczynnikiem wagi i-tego kryterium oceny, charakteryzującym wpływ k_i na ϕ (uśredniony w przedziale $[a_i, b_i]$), natomiast $u_i : [a_i, b_i] \to [0,1]$ jest funkcją preferencji, opisującą nieliniowość wpływu k_i na ϕ.

Funkcja preferencji $u(k_i)$ jest miarą stopnia spełnienia nadrzędnego kryterium optymalizacji ϕ przez poszczególne wartości danego kryterium oceny. Może być też interpretowana jako miara atrakcyjności, jaką ekspert przydaje poszczególnym wartościom k_i ze względu na szeroko rozumiane "dopasowanie" do otoczenia. Stanowi ona uogólnienie znanego z psychologicznej teorii decyzji pojęcia funkcji użyteczności [36].

Przyjmijmy, że dla postaci iloczynowej (5.12) kolejne funkcje φ_i będą miały postać:

$$\varphi_i = (k_i^*)^{\alpha_i}, \tag{5.14}$$

gdzie

$$k_i^* = \frac{k_{iv} - a_i}{b_i - a_i} \tag{5.15}$$

jest unormowaną wartością oceny k_{iv} v-tego wariantu według i-tego kryterium oceny: $k_i^* \in [0,1]$.

Przyjmujemy zatem dwie alternatywne postacie szukanej funkcji skalarnej (zadaniowego kryterium optymalizacji) F:

$$F = \sum_{i=1}^{I} w_i u_i(k_i) \tag{5.16}$$

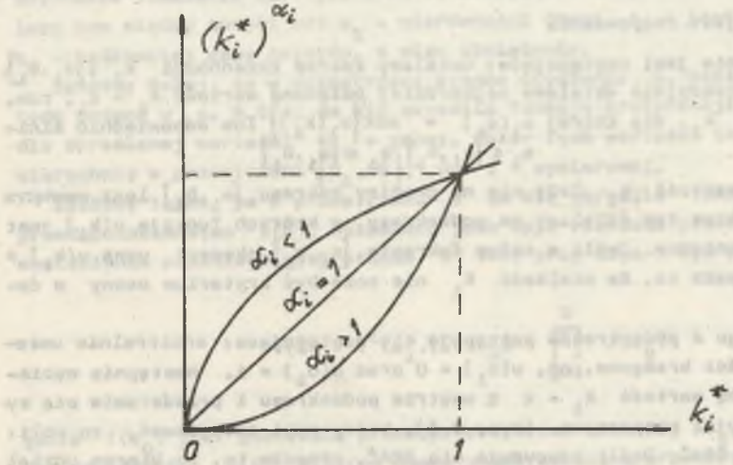
lub

$$F = \prod_{i=1}^{I} (k_i^*)^{\alpha_i} \tag{5.17}$$

Kryterium iloczynowe (5.17) zastosujemy w następujących przypadkach:

- jeśli preferujemy rozwiązania o osiągach k_i skupionych wokół ich wartości średnich,
- w przypadku selekcji,
- jeśli z jakiejś przyczyny nie można doprowadzić kryteriów oceny do wspólnej miary, np. nie można określić funkcji użyteczności $u_i(k_i)$.

W pozostałych przypadkach należy wybrać kryterium liniowe (5.16). Wykładniki potęgowe $\{\alpha_i : i = \overline{1,I}\}$ pełnią rolę analogiczną do współczynników wag w_i w strategii liniowej, przy czym $\alpha_i < 1$ pozwalają silniej różnicować przyrosty k_i w obszarze małych ich wartości (rys. 5.2), a $\alpha_i > 1$ - dużych wartości k_i.



Rys. 5.2. Wpływ współczynników α_i na przebieg funkcji $(k_i^*)^{\alpha_i}$

5.5.3. Funkcja preferencji $u(k_i)$

W ogólnym przypadku przebieg funkcji preferencji w określonym przedziale $k_i \in [a_i, b_i]$ zależy od:

- warunków (całokształtu sytuacji), np. ekspert może uznać niezawodność rakiety meteorologicznej $R = 0{,}90$ za dobrą, gdy koszt zainstalowanej aparatury będzie mały, a za ledwie dostateczną, gdy aparatura będzie unikalna i bardzo kosztowna; podobnie ładowność samochodu osobowego równą 500 kg można uznać za kiepską lub za dobrą zależnie od losowych upodobań użytkowników;
- liczby możliwych powtórzeń danej sytuacji, np. ocena niezawodności rakiety $R = 0{,}9$ będzie inna przy jednym możliwym locie tej rakiety, a inna, gdy stale używamy tego typu rakiet i badania możemy powtarzać;
- granic $[a_i, b_i]$, np. atrakcyjność kwoty 5 zł w przedziale $[0; 9\text{ zł}]$ jest wielokrotnie większa, niż w przedziale $[0; 1000\text{ zł}]$;
- określonego decydenta (lub respondenta występującego w jego imieniu).

5.5.4. Przypadek deterministycznego określania funkcji preferencji [36]

Dla określonego przypadku dane są:

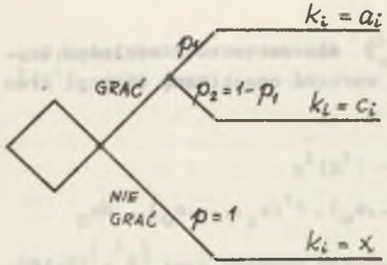
- zbiór obiektów "ciągły" $D = \{d\}$ lub "dyskretny" $D = \{d_v : v = \overline{1,V}\}$,
- kryterium oceny K_i (nazwa), $K_i \in K$,
- wartości tego kryterium $k_i(d_v)$ lub $k_i = k_i(x_1, \ldots, x_p)$,
- określona jest sytuacja użytkowania (stan otoczenia) i liczba powtórzeń,
- określony jest respondent.

Postępowanie jest następujące: ustalamy zakres zmienności $k_i : [a_i, b_i]$, następnie intuicyjnie ustalamy najbardziej pożądaną wartość $k_i = c_i$, tzn. taką wartość k_i, dla której $u_i(c_i) = \max\{u_i(k_i)\}$ lub odpowiednio minimum.

$$c_i \in [a_i, b_i] \quad k_i \in [a_i, b_i]$$

Jeśli ta wartość c_i leży nie na granicy zakresu $[a_i, b_i]$ lecz wewnątrz niego, to zakres ten dzielimy na podzakresy, w których funkcja $u(k_i)$ jest ściśle monotoniczna. Jeśli w całym zakresie $[a_i, b_i]$ ekspert uzna $u(k_i) = \text{const}$, oznacza to, że wielkość K_i nie może być kryterium oceny w danym zadaniu.

Dla każdego z podzakresów postępuje się następująco: arbitralnie ustala się wartości brzegowe, np. $u(a_i) = 0$ oraz $u(c_i) = 1$. Następnie wybiera się dowolną wartość $k_i = x$ z wnętrza podzakresu i przedstawia się sytuację decyzyjną ekspertowi (rys. 5.3), który musi zdecydować, co woli: GRAĆ czy NIE GRAĆ. Jeśli zdecyduje się GRAĆ, oznacza to, że bierze udział w loterii, gdzie z prawdopodobieństwem p_1 wygrywa wartość $k_i = a_i$ lub z prawdopodobieństwem $p_2 = 1 - p_1$ wygrywa wartość c_i. Jeśli decyduje



Rys. 5.3. Sytuacja decyzyjna do wyznaczania wartości funkcji preferencji $u = u(k_i = x) = p_1$

się NIE GRAĆ, otrzymuje bez ryzyka wartości $k_i = x$. Nie zmieniając wartości innych kryteriów oceny $k_j \in \{k\}$, $k_j \neq k_i$, zmieniamy wartość prawdopodobieństwa p_1 tak długo, aż obie możliwe decyzje są dla eksperta równocenne i tę wartość przyjmujemy jako wartość funkcji preferencji i nanosimy na wykres $u_i = u(k_i)$. Tę procedurę powtarzamy dla dostatecznie dużej liczby punktów $x \in [a_i, c_i]$.

5.5.5. Przypadek losowego określenia funkcji preferencji przy ciągłych współrzędnych przestrzeni stanu [74]

W rozdz. 5.5.3 zauważyliśmy, że w ogólnym przypadku przebieg funkcji preferencji zależy od warunków otoczenia. Ponieważ szukana funkcja preferencji dotyczy przyszłych stanów otoczenia, należy więc prognozować te stany, a stąd wynika losowy ich opis.

Załóżmy, że wszystkie możliwe stany otoczenia S mogą być określone w pewnej przestrzeni kartezjańskiej za pomocą wektora stanu, posiadającego skończoną liczbę współrzędnych $\{s_g : g = \overline{1,G}\}$ ciągłych lub dyskretnych, zdefiniowanych i mierzalnych. Zmienne te dalej nazywać będziemy zmiennymi stanu. Każdy stan otoczenia S^t może więc być jednoznacznie określony za pomocą zbioru wartości zmiennych stanu: $S^t = [s_1, s_2, \ldots, s_G]$.

Na przykład szukając funkcji preferencji "u" różnych wartości współczynników tłumienia amortyzatorów samochodu osobowego stwierdzamy, że zależy ona między innymi od: s_1 - nierówności drogi, s_2 - prędkości jazdy, s_3 - całkowitej masy pojazdu, a więc obciążenia.

Załóżmy dalej, że w przestrzeni stanów otoczenia S, posługując się metodą podaną w p. 5.5.4, da się określić funkcję preferencji $u_i = u_i(S^t)$ dla określonej wartości $k_{io} = \text{const}$. Zbiór tych wartości tworzy pewną powierzchnię w przestrzeni $\{u_i, S\}$, $G + 1$ - wymiarowej.

Załóżmy także, że w przestrzeni S da się określić funkcję gęstości prawdopodobieństwa $f(S)$, rozumianą jako opis rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienie poszczególnych stanów $S^t \in S$, przy czym w tym przypadku:

$$f(S) = f^t(s_1, \ldots, s_G) = \prod_{g=1}^{G} f(s_g),$$

gdzie $f(s_g)$ jest gęstością prawdopodobieństwa zmiennej s_g. Analogicznie jak poprzednio, $f(S)$ utworzy pewną powierzchnię w przestrzeni $\langle f, S \rangle$.

Wartość funkcji preferencji $u_i(k_i = k_{io})$ dla wszystkich możliwych stanów otoczenia S^t zdefiniujemy zatem jako wartość oczekiwaną funkcji preferencji:

$$u_i(k_{io}) = \int_{\underline{s}_1}^{\overline{s}_1} ds_1 \int_{\underline{s}_2}^{\overline{s}_2} ds_2 \dots \int_{\underline{s}_G}^{\overline{s}_G} u_{io}^t(s_1,\dots,s_G) \cdot f^t(s_1,\dots,s_G) \cdot ds_G \tag{5.18}$$

Zmieniając wartości k_{io} w całym przedziale a_i, b_i możemy określić szukaną funkcję preferencji dla danego kryterium oceny k_i.

Omówiony tu przypadek jest jednak teoretyczny, gdyż funkcja podcałkowa z pewnością nie ma charakteru analitycznego, a w szczególności funkcja preferencji $u_i(k_{io}, S^t)$, która jest określana przez eksperta, a więc nieanalitycznie. Prócz tego pokazane postępowanie jest bardzo pracochłonne.

5.5.6. Przypadek losowego określania funkcji preferencji przy dyskretnych współrzędnych przestrzeni stanu [74]

Praktyczne znaczenie ma przypadek dyskretny: arbitralnie dokonuje się segmentacji przedziałów $[\underline{s}_g, \overline{s}_g]$ na skończoną liczbę podzakresów, reprezentowanych np. ich nazwami albo wartościami średnimi

$$s_g^{l_g} : [\underline{s}_g, \overline{s}_g] \to \left\{ s_g^1, \dots, s_g^{l_g}, \dots, s_g^{L_g} \right\}.$$

Na przykład zakres temperatur otoczenia $[-10^oC, +20^oC]$ możemy zastąpić trzema podzakresami o temp. średnich: -5, +5 i 15°C lub nazwami: "temperatury niskie", "temperatury średnie" i "temperatury wysokie".

Możemy więc zdefiniować pewien skończony zbiór stanów otoczenia $\{S^t : t = \overline{1,T}\}$, który jest iloczynem kartezjańskim wyróżnionych stanów poszczególnych zmiennych $\{s_g^{l_g} : l_g = 1,\dots,L_g\}$:

$$\{S^t\}_{t=\overline{1,T}} = \{s_1^{l_1}\}_{l_1=\overline{1,L_1}} \times \dots \times \{s_g^{l_g}\}_{l_g=\overline{1,L_g}} \times \dots \{s_G^{l_G}\}_{l_G=\overline{1,L_G}} \tag{5.19}$$

przy czym moc tego zbioru: $T = \prod_{g=1}^{G} L_g$.

Następnie, posługując się metodą podaną w p. 5.5.4 każdemu stanowi S^t przy określonej wartości $k_i = k_{io}$ możemy przypisać pewną wartość funkcji preferencji $u_i(k_{io}, S^t) = u_{io}^t$.

Z kolei każdemu ze stanów S^t przypisujemy pewna prawdopodobieństwo $p^t(S^t)$, przy czym:

$$p^t(S^t) = p^t = \prod_{g=1}^{G} p(s_g^{l_g}), \tag{5.20}$$

gdzie $\{s_g^{l_g}\}$ jest zbiorem stanów kolejnych zmiennych konstytuujących dany stan otoczenia S^t, a p jest prawdopodobieństwem poszczególnych stanów, przy czym musi być spełniony warunek:

$$\sum_{l_g=1}^{L_g} p(s_g^{l_g}) = 1, \quad \text{dla} \quad g = \overline{1,G} \tag{5.21}$$

Uwzględniając więc definicję podaną w p. 5.5.5 określimy wartość funkcji preferencji $u_i(k = k_{io})$ dla wszystkich możliwych dyskretnych stanów otoczenia $\{S^t, t = \overline{1,T}\}$ jako wartość oczekiwaną dla wszystkich losowych stanów otoczenia:

$$u_i(k_{io}) = \sum_{t=1}^{T} u_{io}^t \cdot p^t \tag{5.22}$$

Przykład:

Należy ocenić jakość pewnego zbioru katalogowych robotów przemysłowych w celu zakupu jednego z nich. Jednym spośród kilku przyjętych kryteriów oceny jest uniwersalność zastosowania, którą zdecydowano się mierzyć liczbą podstawowych programów (k_1). W rozpatrywanym zbiorze robotów liczba ta waha się od 3 do 20, przy czym jako minimum przyjęto 2, zatem $a_1 = 2$, $b_1 = 20$. Dla rozpatrywanego kryterium k_1 przyjęto następujące dwie zmienne otoczenia: s_1 - liczba przyszłych zastosowań robota i s_2 - możliwość zakupu w przyszłości innych typów robota. Dla pierwszej zmiennej wyróżniono trzy stany: $s_{11}:(s_1 < 3)$, $s_{12}:(3 \leq s_1 \leq 6)$, $s_{13}:(s_1 > 6)$.

Dla drugiej zmiennej dwa stany: s_{21}: TAK, s_{22}: NIE. Po przeprowadzeniu odpowiednich badań prognostycznych określamy prawdopodobieństwa poszczególnych stanów $s_g^{l_g}$ obu zmiennych ($g = 1,2$): $p_{11} = 0,1$, $p_{12} = 0,6$, $p_{13} = 0,3$, $p_{21} = 0,4$, $p_{22} = 0,6$. Mamy więc 6 możliwych stanów otoczenia S^t, $t = 1,\dots,6$ i ich prawdopodobieństwa p^t, $t = 1,\dots,6$:

$s^1 = s_{11} \wedge s_{21}$, $p^1 = p_{11} \cdot p_{21} = 0{,}1 \cdot 0{,}4 = 0{,}04$

$s^2 = s_{11} \wedge s_{22}$, $p^2 = p_{11} \cdot p_{22} = 0{,}1 \cdot 0{,}6 = 0{,}06$

$s^3 = s_{12} \wedge s_{21}$, $p^3 = p_{12} \cdot p_{21} = 0{,}6 \cdot 0{,}4 = 0{,}24$

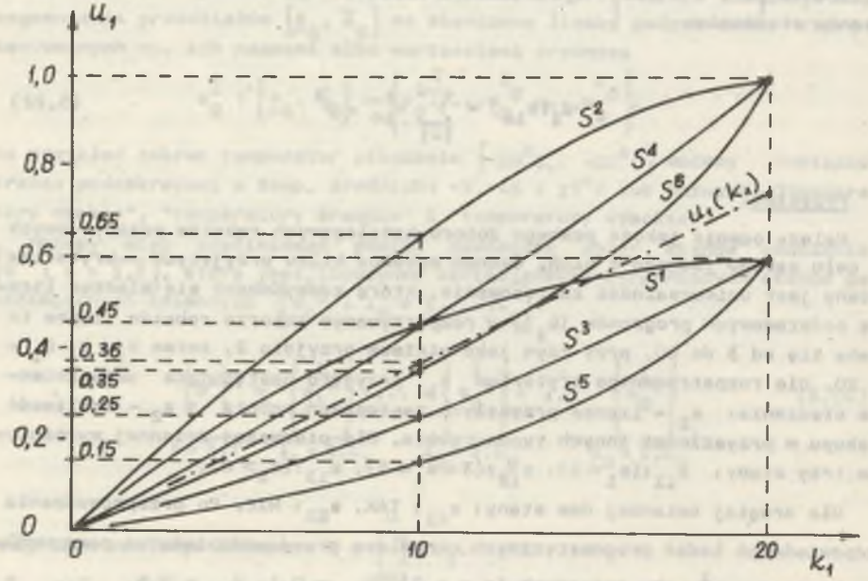
$s^4 = s_{12} \wedge s_{22}$, $p^4 = p_{12} \cdot p_{22} = 0{,}6 \cdot 0{,}6 = 0{,}36$

$s^5 = s_{13} \wedge s_{21}$, $p^5 = p_{13} \cdot p_{21} = 0{,}3 \cdot 0{,}4 = 0{,}12$

$s^6 = s_{13} \wedge s_{22}$, $p^6 = p_{13} \cdot p_{22} = 0{,}3 \cdot 0{,}6 = 0{,}18$

$$\sum_{t=1}^{6} p^t = 1{,}00$$

Następnie, posługując się metodą pokazaną w p. 5.2, określamy przebieg funkcji preferencji $u^t(k_1)$, osobno dla każdego stanu $t = 1,\ldots,6$ (rys. 5.4).



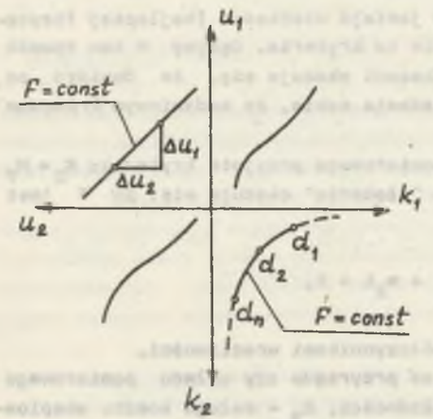
Rys. 5.4. Przebieg funkcji preferencji dla stanów S^1 do S^6 oraz przebieg uśredniony $u_1 = u(k_1)$

. Wreszcie, korzystając ze wzoru na $u_i(k_{io})$ określamy wartość oczekiwaną funkcji preferencji dla wybranych wartości, np. $k_1 = 10$ i $k_1 = 20$, biorąc u^t z kolejnych wykresów: np. $u_1(10) = 0{,}45 \cdot 0{,}04 + 0{,}65 \cdot 0{,}06 + 0{,}25 \cdot 0{,}24 + 0{,}45 \cdot 0{,}36 + 0{,}15 \cdot 0{,}12 + 0{,}35 \cdot 0{,}18 = 0{,}36$. Rezultat, czyli $u(k_1)$, pokazano na wykresie linią punktową.

5.5.7. Określanie współczynników wagi w_i

Istnieje wiele intuicyjnych sposobów określania wartości współczynników wagi w_i dla poszczególnych kryteriów oceny k_i, $i = \overline{1,I}$ [31]. Tu pokażemy sposób najmniej arbitralny, oparty na pojęciu funkcji użyteczności.

Załóżmy, że jest dany zbiór kryteriów oceny $\{K_i\}$ oraz zbiór ich funkcji preferencji $u_i(k_i)$. Należy znaleźć zbiór wartości współczynników wagi $\{w_i\}$ taki, aby funkcja $F = \sum_{i=1}^{i=I} w_i \cdot u_i(k_i)$ mogła być miarą jakości w sensie opisanym w p. 5.4.



Rys. 5.5. Wyznaczanie współczynnikow wagi w_i

Weźmy dowolną parę kryteriów $K_1, K_2 \in \{K_i\}$ oraz ich funkcje preferencji u_1 i u_2 i przedstawmy to na wykresie (rys. 5.5). Korzystając z pomocy eksperta, na płaszczyźnie $\langle k_1, k_2 \rangle$ określamy kilka obiektów równocennych: $d_1, d_2, \ldots, d_n$ o różnych wartościach k_1, k_2, tzn. takich, że $F(d_1) = F(d_2) = \ldots = F(d_n)$, przy czym wartości pozostałych kryteriów $k_3, k_4, \ldots, k_I$ pozostają niezmienne na swoich średnich wartościach. Po przerzutowaniu krzywej $F = \text{const}$ z płaszczyzny $\langle k_1, k_2 \rangle$ otrzymujemy krzywą stałej wartości $F = \text{const}$ na płaszczyźnie $\langle u_1, u_2 \rangle$. Ponieważ $F(d_1) = F(d_2)$, więc $w_1 \cdot u_1(d_2) + w_2 \cdot u_2(d_2) = w_1 \cdot u_1(d_1) + w_2 \cdot u_2(d_1)$, skąd otrzymujemy:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{u_1(d_1) - u_1(d_2)}{u_2(d_2) - u_2(d_1)} = \frac{\Delta u_1}{\Delta u_2} \qquad (5.23)$$

Jeśli przyjmiemy $w_1 = 1$, to $w_2 = \frac{\Delta u_1}{\Delta u_2}$.

Jeżeli okaże się, że krzywa $F = const$ w płaszczyźnie $\langle u_1, u_2 \rangle$ bardzo odbiega od linii prostej, to świadczy to o tym, że albo: 1) pozostałe trzy krzywe nie odpowiadają istotnym przekonaniom eksperta, albo 2) kryteria oceny są zależne, albo 3) liniowa postać F nie jest adekwatna dla danego przypadku. W związku z tym rezultaty tego działania stanowią pewien sposób weryfikacji poprawności wszystkich poprzednich działań.

Postępując analogicznie z następną parą kryteriów oceny: k_2, k_3 i przyjmując wartość w_2 wyliczoną w poprzednim kroku, możemy obliczyć wartość w_3 i tak dalej aż do ostatniego kryterium k_I.

Ostatnią czynnością jest normalizacja wartości w_i taka, aby $\sum_{i=1}^{I} w'_i = 1$, korzystając ze wzoru: $w'_i = \frac{w_i}{\sum w_i}$.

5.5.8. Podsumowanie paragrafu 5.5

1. W punkcie 5.5 tej pracy zaproponowano model ilościowego określania jakości obiektu d, należącego do danego zbioru D. Jest regułą, że projektant chce uwzględnić wiele aspektów K_i. Powstaje pytanie: jak je zagregować.

Znając zbiór kryteriów K, szukamy jakiejś wielkości (najlepiej fizycznej), ogólniejszej, która łączy w sobie te kryteria. Dążymy w ten sposób do optymalizacji jednokryterialnej. Czasami okazuje się, że dopiero po zestawieniu listy K projektant uświadamia sobie, że zadaniowym kryterium F może być znana wielkość.

Przykład: Dla łożyska przyrządu pomiarowego przyjęto kryteria: $K_1 = M_T$ (moment tarcia), $K_2 = L$ (luz). Po ich "złożeniu" okazuje się, że F jest dokładnością statyczną przyrządu δ:

$$\delta = w_1 M_T + w_2 L = F,$$

gdzie w_1 i w_2 są odpowiednimi współczynnikami wrażliwości.
Często kryterium F jest koszt, np. od przyrządu czy układu pomiarowego żądamy: K_1 - niezawodności, K_2 - dokładności, K_3 - małego kosztu eksploatacji. Po "złożeniu" tych kryteriów okazuje się, że F jest kosztem uzyskania informacji na pewnym poziomie wiarygodności. Kryterium F może być też interpretowane jako wygoda eksploatacji, wygoda realizacji itd.

Jeśli projektant nie jest przekonany o poprawności zbudowanego przez siebie zadaniowego kryterium optymalizacji, powinien zrezygnować z agregacji i przejść do bloku 7 (rys. 3.3), czyli przeprowadzić polioptymalizację.

2. Zaproponowany, podstawowy model jest liniowy względem funkcji preferencji $u_i(K_i)$: $F(d_v) = \sum w_i u_i(k_{iv})$, gdzie u_i jest funkcją preferencji. Wartość tej funkcji może być wyliczana deterministycznie (por. p. 5.5.4)

lub probabilistycznie: przy "ciągłych" (5.5.5) lub "dyskretnych" (5.5.6) zbiorach stanów otoczenia, natomiast w_i są współczynnikami wagi (5.5.7).

3. Model jest przeznaczony dla takich przypadków, gdy zależność $\phi = \phi(X)$ nie jest dana matematycznie.

4. Proponowany model jest uniwersalny: może być użyty do dowolnych obiektów spotykanych w technice, abstrakcyjnych lub konkretnych. Addytywność tego modelu nie umniejsza jego ogólności i zakresu ważności.

5. Model może być dowolnie upraszczany, zależnie od potrzeb i możliwości oraz od dostępnej informacji.

6. Subiektywizm jest "zepchnięty" na dość niski szczebel ogólności i złożoności: od respondenta (eksperta) oczekuje się tylko wypowiedzi o charakterze dychotomicznym (tak - nie lub "wybierz jedną z dwóch możliwości").

7. Dla przypadku ocen rozmytych (gdy kryterium oceny nie jest wielkością mierzalną) można zastosować funkcję przynależności, znaną w teorii zbiorów rozmytych.

6. UWAGI O OPTYMALIZACJI W PROJEKTOWANIU TECHNICZNYM

W tym rozdziale ograniczymy się do kilku uwag dotyczących ostatniego działania w procesie wyboru, jakim jest optymalizacja. W szczególności zwrócimy uwagę na związki między tym działaniem a działaniami poprzedzającymi, charakterystyczne dla przypadku wyboru w projektowaniu technicznym. Nie jest celem tego rozdziału dyskusja metod optymalizacji ani monograficzne opracowanie procesu optymalizacji.

Na wstępie zwróćmy uwagę na udział projektanta w samym procesie optymalizacji, w przeciwieństwie do programisty, który stara się rozwiązać zadanie optymalizacji tak jak ono zostało postawione, tzn. wybiera metodę i uruchamia odpowiedni program. Zadaniem projektanta jest sformułowanie zadania optymalizacji, co realizuje się w działaniach 1 do 6 (rys. 3.4). Jednak i w fazie optymalizacji konieczny jest udział projektanta, między innymi powinien on:

1) rozluźniać (osłabiać) niektóre wymagania nierównościowe lub zmieniać równościowe, gdy zadanie optymalizacji nie ma w ogóle rozwiązań,

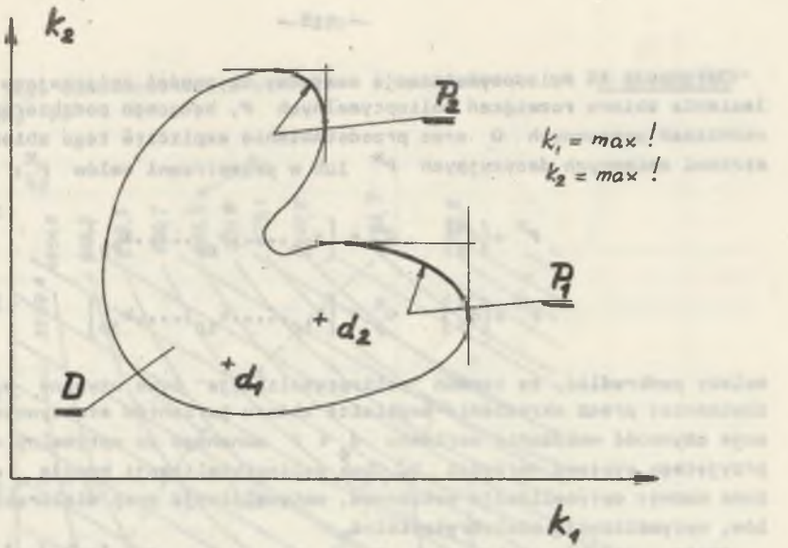
2) upraszczać model matematyczny, gdy czas obliczeń jest nadmiernie długi lub go wzbogacać, gdy rozwiązania okazują się nonsensowne,

3) ustalać krok zmienności poszczególnych zmiennych oraz wskazać ewentualne obszary w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych, gdzie można spodziewać się rozwiązania optymalnego, na podstawie dotychczasowego doświadczenia (sugestie takie w programowaniu całkowito-liczbowym bywają nazywane heurystykami),

4) zmodyfikować - w razie potrzeby - zadanie optymalizacji, np. zamiast rozwiązania ściśle optymalnego szukać rozwiązania suboptymalnego lub szukać rozwiązania satysfakcjonującego (podając wartość F_{min}) albo sformułować zadanie polioptymalizacji i wskazać kryteria.

6.1. Polioptymalizacja [6], [27], [53], [88]

Zauważmy, że w zbiorze wariantów poprawnych D można najczęściej określić pewien podzbiór wariantów, które są gorsze od innych ze względu na wszystkie kryteria oceny $K_1,\ldots,K_I$. Na przykład wariant d_1 jest gorszy od wariantu d_2 ze względu na obydwa kryteria (rys. 6.1). Jeśli w tym przykładzie będą tylko dwa kryteria (I = 2), to powiemy, że wariant d_2 dominuje wariant d_1 (odpowiednio wariant d_1 jest zdominowany przez d_2), co zapisujemy: $d_2 \succ d_1$.



Rys. 6.1. Przykład zbioru wariantów poprawnych D i zbioru wariantów efektywnych P, gdzie $D \supset P = P_1 \cup P_2$

Definicja 1: Mówimy, że wariant $d_v \in D$ dominuje nad wariantem d_u, co zapisujemy: $d_v \succ d_u$, jeżeli dla wszystkich ocen k_{iv} i k_{iu} wartości funkcji użyteczności $u(k_{iv})$ są nie mniejsze od wartości $u(k_{iu})$ oraz jednocześnie istnieje co najmniej jedno takie kryterium $K_j \in K$, że oceny dla tego kryterium k_{jv} i k_{ju} spełniają ostry warunek: $u(k_{jv}) > u(k_{ju})$:

$$d_v \succ d_u \Leftrightarrow \left\{ \bigwedge_{i \in [1,I]} u(k_{iv}) \geq u(k_{iu}) \right\} \wedge \left\{ \bigvee_{j \in [1,I]} u(k_{jv}) > u(k_{ju}) \right\} \tag{6.1}$$

albo

$$d_v \succ d_u \Leftrightarrow \left\{ \bigwedge_{i \in [1,I]} k^*_{iv} \geq k_{iu} \right\} \wedge \left\{ \bigvee_{j \in [1,I]} k^*_{jv} > k^*_{ju} \right\} \tag{6.1a}$$

Definicja 2: Zbiór wszystkich wariantów $d_p \in D$, dla których nie można znaleźć rozwiązań dominujących $d \in D$, tworzy zbiór rozwiązań polioptymalnych P (inne nazwy: efektywnych, niezdominowanych, kompromisowych, sprawnych, Pareto-optymalnych, zbiór Pareto)

$$d_v = d_p \Leftrightarrow \left\{ \sim \bigvee d_z \in D : d_z \succ d_v \right\} \tag{6.2}$$

$$D \supset P = \left\{ d_p : p = \overline{1,V_p} \right\}, \quad V_p \leq V \tag{6.3}$$

Definicja 3: Polioptymalizacją nazywamy czynności zmierzające do znalezienia zbioru rozwiązań polioptymalnych P, będącego podzbiorem zbioru rozwiązań poprawnych D oraz przedstawienie explicite tego zbioru w przestrzeni zmiennych decyzyjnych P^X lub w przestrzeni celów P^K:

$$P^X = \{d_p^X\} \qquad d_p^X = [x_{1p},\ldots,x_{pp},\ldots,x_{Pp}] \tag{6.4}$$

$$P^K = \{d_p^K\} \qquad d_p^K = [k_{1p},\ldots,k_{ip},\ldots,k_{Ip}] \tag{6.5}$$

Należy podkreślić, że termin "polioptymalizacja" bywa używany w szerszym znaczeniu: prócz określenia explicite zbioru wariantów efektywnych P obejmuje czynność wskazania wariantu $d_o \in P$ uznanego za optymalny w świetle przyjętego systemu wartości W. Obok polioptymalizacji bywają stosowane inne nazwy: optymalizacja wektorowa, optymalizacja przy wielorakości celów, optymalizacja wielokryterialna.

Zbiór wariantów efektywnych P ma szereg własności [53], [44], z których interesujące ze względu na możliwości graficznego przedstawiania są następujące:

1) dla ciągłych kryteriów oceny K_i zbiór P jest tworem geometrycznym o wymiarowości co najwyżej (I - 1),

2) warianty maksymalizujące poszczególne kryteria należą do zbioru P,

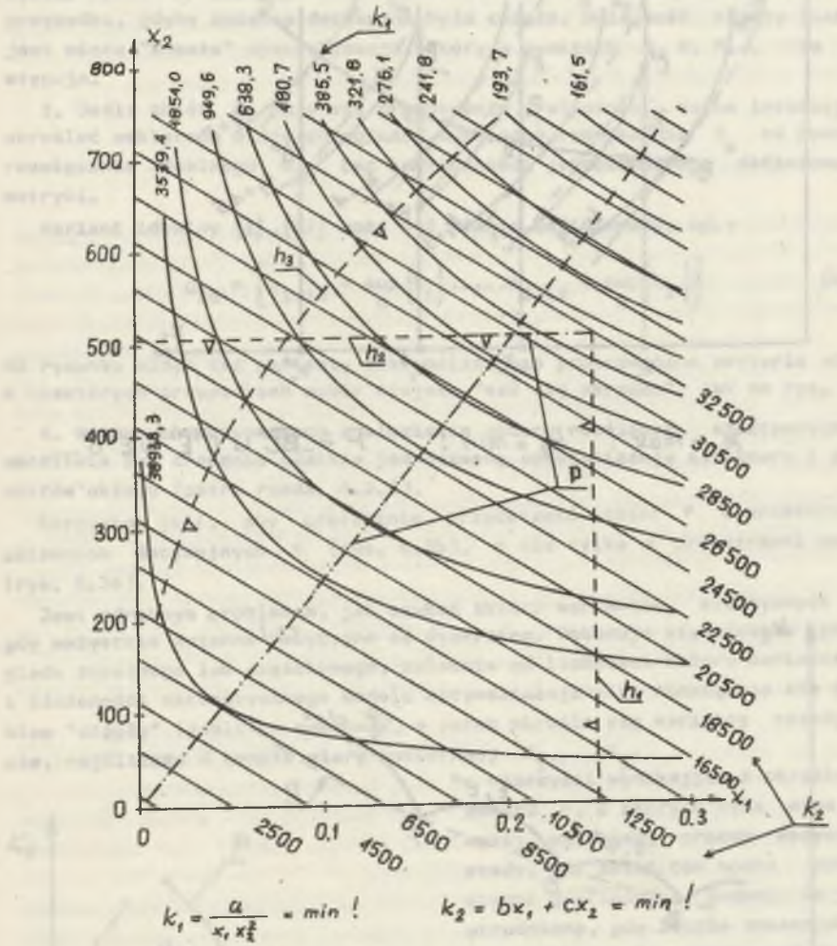
3) warianty maksymalizujące skalarne kryterium kompleksowe F liniowe, koniunkcyjne lub alternatywne (rozdz. 5.5.2) należą do zbioru P (dla wypukłego zbioru P jest to warunek konieczny i wystarczający),

4) jeśli wariant d_p należy do zbioru P_I dla I kryteriów, należy też do zbioru P_{I+1} dla (I + 1) kryteriów oceny.

Określanie (w postaci wykresu lub tablicy) zbioru wariantów polioptymalnych związane jest zawsze z nakładami czasu i pieniędzy. Nakłady te można zmniejszyć dysponując odpowiednim oprogramowaniem i sprzętem (np. monitorem graficznym), co jednak jest opłacalne tylko dla problemów powtarzalnych. Celowość przedstawiania explicite zbioru P w przypadku wyboru w projektowaniu technicznym wynika z tego, że projektant i decydent uzyskują znacznie lepszy "wgląd" w sytuację konfliktową między kryteriami i ograniczeniami. Ułatwia to w sposób zasadniczy podejmowanie decyzji intuicyjnych, co jest szczególnie ważne, gdy są wątpliwości co do matematycznej postaci kryterium zadaniowego F, wartości współczynników wagi w_i, przebiegu funkcji użyteczności $u_i(k_i)$ itd. W szczególności projektant widzi obrazowo:

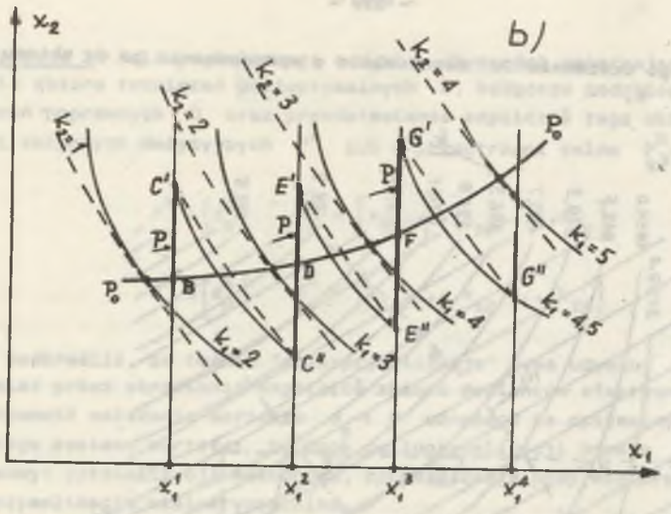
1. Jaka jest rola ograniczeń S (rozdz. 3.4); niektóre są nieefektywne (np. h_1 i h_3, rys. 6.2), szczególnie, gdy zbiór P nie leży na ograniczeniach. Widząc jaka jest rola określonego ograniczenia można podjąć

decyzję o jego uzmiennieniu, ewentualnie o wprowadzeniu go do zbioru kryteriów oceny K.

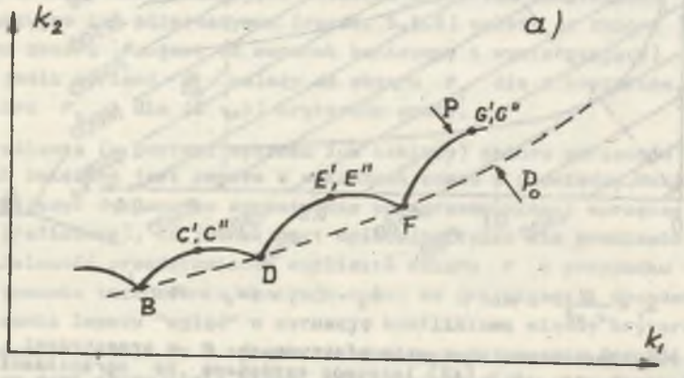


Rys. 6.2. Przykład zbioru wariantów efektywnych P w przestrzeni zmiennych decyzyjnych $\langle x_1, x_2 \rangle$ [43] leżącego częściowo na ograniczeniu h_2, ograniczenia h_1 i h_3 - nieefektywne

2. Jaki jest "koszt" dyskretyzacji zmiennych decyzyjnych, rozumiany jako pogorszenie wartości kryteriów oceny. Na rys. 6.3 pokazano przykład polioptymalizacji przy dwóch zmiennych decyzyjnych x_1 i x_2 i dwóch kryteriach k_1 i k_2. Zmienna x_1 jest zmienną dyskretną i może przyjmować skończoną liczbę stanów: $x_1^1, x_1^2, \ldots$, np. ze względu na normalizację war-



$k_1 = max\ !\quad k_2 = min\ !\qquad P \triangleq \ldots \overline{BC'} \cup \overline{C''E'} \cup \overline{E''G'} \ldots$



Rys. 6.3. Przykład zbioru wariantów efektywnych P dla przypadku, gdy jedna zmienna decyzyjna x_1 jest dyskretna a druga, x_2 jest ciągła (oraz gdy $k_1 = max!$ i $k_2 = min!$) [70]
a) w przestrzeni celów, b) w przestrzeni zmiennych decyzyjnych, P_o - zbiór wariantów efektywnych dla przypadku, gdyby zmienna x_1 była zmienną ciągłą

tości. Linia P pokazuje zbiór Pareto, a linia P_o pokazuje zbiór Pareto dla przypadku, gdyby zmienna decyzyjna była ciągła. Odległość między liniami jest miarą "kosztu" dyskretyzacji, który w punktach B, D, F... nie występuje.

3. Jeśli zbiór P daje się przedstawić graficznie, można intuicyjnie określać wektorową miarę odległości dowolnego rozwiązania d_p od pewnego rozwiązania idealnego d_{id}, bez konieczności jednoznacznego definiowania metryki.

Wariant idealny [1], [27] może być różnie definiowany, np.:

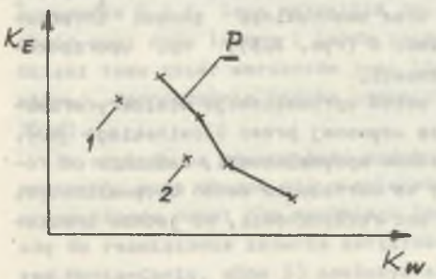
$$d_{id} = \left[k_{1\,id} = \sup_{D}\left\{k_1\right\}, \ldots, k_{I\,id} = \sup_{D}\left\{k_I\right\}\right] \qquad (6.6)$$

Na rysunku widać też warianty maksymalizujące poszczególne kryteria oceny. W niektórych przypadkach wybór niejako "sam się narzuca", jak na rys. 6.7.

4. W pewnych przypadkach znalezienie zbioru rozwiązań efektywnych P umożliwia lub znacznie ułatwia jednoczesną optymalizację struktury i parametrów układu (patrz rozdz. 6.2.6).

Korzystne jest, aby graficznie przedstawić zbiór P w przestrzeni zmiennych decyzyjnych X (rys. 6.3b), a nie tylko w przestrzeni celów (rys. 6.3a).

Jest odrębnym problemem, jak szukać zbioru wariantów efektywnych P, gdy wszystkie zmienne decyzyjne są dyskretne. Dokonuje się wówczas przeglądu zupełnego lub częściowego, zależnie od liczności zbioru wariantów A i złożoności matematycznego modelu optymalizacji albo rozwiązuje się problem "ciągły" (jeśli to możliwe), a potem określa się warianty rzeczywiste, najbliższe w sensie miary wektorowej $K_1, \ldots, K_I$.



Rys. 6.4. Zbiór Pareto ze względu na zagregowane kryteria
K_W - kryterium obejmujące wszystkie kryteria użytkowe, K_E - kryteria obejmujące kryterie ekonomiczne, 1,2 - warianty nie należące do zbioru Pareto

Korzyści wynikające z określania zbioru P, o których była mowa powyżej, występują przede wszystkim wtedy, gdy zbiór ten można przedstawić graficznie. Zadanie to jest utrudnione, gdy liczba zmiennych decyzyjnych $P > 2$ i jednocześnie liczba kryteriów $I > 2$, co jest częstym przypadkiem w nietrywialnych zadaniach projektowych. Można wówczas próbować agregować zmienne. W pracy [23, s. 72] pokazano przykład agregacji 4 zmiennych decyzyjnych do 2, dzięki czemu można było pokazać zbiór Pareto na płaszczyźnie przy trzech kryteriach oceny [70]. Agregacji mogą podlegać również kryte-

teria, np. na rys. 6.4 pokazano zbiór pewnych konstrukcji na płaszczyźnie K_U i K_E, które obliczano wg wzoru (5.16). Inne sposoby dyskutowano w pracy [44].

Pomimo różnych trudności przekonanie o celowości szukania zbioru P staje się coraz powszechniejsze i notuje się szybki wzrost publikacji z tego zakresu oraz ożywioną działalność naukową w kraju i za granicą.

6.2. Optymalizacja

Zadaniem optymalizacji (lub odpowiednio satysfakcji) jest wskazanie jednego wariantu poprawnego $d \in D$, optymalnego d_o lub satysfakcjonującego d_s, zdefiniowanego wzorami 3.4, 3.19 lub 3.20. Przypomnijmy, że przez wskazanie wariantu d rozumie się określenie wartości wszystkich niezbędnych zmiennych decyzyjnych X_p (patrz (3.5)). W przypadku projektowania technicznego decydent zwykle żąda ponadto podania wartości kryterium zadaniowego F dla wskazanego wariantu oraz wartości tego kryterium dla "najbliższych" gorszych wariantów, w sensie różnicy $F(d_o) - F(d)$.

Do optymalizacji przystępujemy mając następujące dane:

1) w przypadku "ciągłego" zbioru rozwiązań (rys. 3.3):
   - wymagania S, model obiektu $\{f_s = 0: s = \overline{1,S}\}$ oraz skalar F albo
   - zbiór P i skalar F,

2) w przypadku skończonego zbioru rozwiązań (rys. 3.4):
   - wymagania S, tablica ocen k_{iv} i skalar F albo
   - zbiór D, tablica ocen k_{iv} i skalar F, albo
   - zbiór P, tablica ocen k_{iv} i skalar F.

W przypadku rozwiązywania zadania satysfakcji - dodatkowo wartość F_{min} lub zbiór wartości $\{k_{i\,min}: i = \overline{1,I}\}$. W niektórych przypadkach (o których mowa w p. 6.2.5) rezygnuje się z definiowania skalara $F = F(k_1,\ldots,k_I)$, zadowalając się zbiorem $\{k_i: i = \overline{1,I}\}$ oraz ewentualnie innymi informacjami dodatkowymi, wygenerowanymi w bloku 6 (rys. 3.3), np. uporządkowaniem kryteriów oceny K_i wg ich ważności.

Nie negując trafności klasyfikacji metod optymalizacji wielokryterialnej, podanej przez Hwanga [27], a także używanej przez Słowińskiego [60], wyróżnimy tu pewne typowe klasy przypadków optymalizacji, zależnie od rodzaju informacji początkowej. Nie jest to morfologia zadań optymalizacji, gdyż nie spełnia postulatu zupełności ani rozłączności, ma jednak znaczenie praktyczne.

6.2.1. Optymalizacja "ciągła"

Dany jest matematyczny model optymalizacji w postaci analitycznych jawnych zależności deterministycznych: model matematyczny obiektu (równania 3.22 lub 3.23), wymagania (3.11) oraz skalarna postać funkcji celu F

(5.6). Co najmniej jedna zmienna decyzyjna jest ciągła. Można wyrugować z układu równań i nierówności zmienne zależne Y_r i wówczas model matematyczny optymalizacji można przedstawić w klasycznej postaci:

$$\left.\begin{aligned} &f_i(x_1,\ldots,x_P) = 0 \quad i = \overline{1,I} \\ &g_j(x_1,\ldots,x_P) \geq 0 \quad j = \overline{1,J} \\ &F(x_1,\ldots,x_D) = \max! \end{aligned}\right\} \tag{6.7}$$

Wykorzystuje się klasyczne metody optymalizacji: analityczne lub numeryczne (patrz np. [17], [18], [57]).

Przykładem może być poszukiwanie takich wymiarów elementu konstrukcyjnego maszyny, aby miał on wymaganą wytrzymałość i minimalny ciężar. Ten rodzaj optymalizacji nazywany bywa optymalizacją parametryczną.

6.2.2. Optymalizacja na zbiorze skończonym, niezbyt licznym

Dany jest skończony zbiór wariantów $D = \{d_v: v = \overline{1,V}\}$, przy czym liczność zbioru V nie przekracza kilku do kilkunastu elementów. Dana jest macierz ocen $\{k_{iv}\}$ o wymiarach I x V. Jest tylko kilka zmiennych decyzyjnych X_p, często są to liczby porządkowe.

Dla każdego wariantu można obliczyć wartość skalara F. Optymalizacja robiona jest metodą przeglądu zupełnego i znalezienie wariantu optymalnego $d_o \in D$ nie nastręcza trudności.

Przykłady: wybór optymalnej koncepcji rozwiązania projektowego, wybór optymalnej oferty, wybór z katalogu.

6.2.3. Optymalizacja na licznym zbiorze skończonym

Model matematyczny optymalizacji dany jest w takiej postaci jak dla przypadku 6.2.1, lecz wszystkie zmienne decyzyjne X_p są dyskretne, ich zbiór jest dość liczny i każda ze zmiennych może przyjmować dużo stanów. Dzięki temu zbiór wariantów jest liczny lub bardzo liczny (np. kilka tysięcy). Jednocześnie liczba ograniczeń jest d[illegible] (liczby I i J we wzorze 3.11).

Ze względu na nieciągłość modelu matematycznego klasyczne metody optymalizacji mogą okazać się nieskuteczne, a metoda przeglądu zupełnego zbyt pracochłonna nawet dla szybkiego komputera. Można wówczas: 1) ograniczyć się do rozwiązania zadania satysfakcji, albo 2) wykorzystać jedną z metod Monte-Carlo, albo 3) posłużyć się metodą przeglądu częściowego. Pierwsze wymaga zgody decydenta i określenia wartości F_{min}. Drugie nie daje pewności co do odległości uzyskanego rozwiązania od rozwiązania globalnie optymalnego (w sensie różnicy wartości skalara F lub inaczej rozumianej miary jakości). Trzecie wymaga sformułowania przez decydenta (lub projektanta) pewnych sugestii co do tego, w jakim podobszarze D można spodzie-

wać się rozwiązania optymalnego. Sugestie te, w formie pewnych zasad heurystycznych (np. zasad projektowania czy konstruowania) bywają bardzo skuteczne. Na przykład wiadomo, że w przekładniach zębatych serwomechanizmów (układów nadążnych) należy stosować największe przełożenie pierwszego stopnia przekładni, aby uzyskać najmniejsze opory ruchu [48], albo: minimalizując błąd statyczny mechanicznych przyrządów pomiarowych pracujących w układzie "siłowym" należy maksymalizować siłę wytwarzaną przez sygnał wejściowy [64]. Omawiany tu przypadek optymalizacji bywa nazywany programowaniem całkowito-liczbowym.

Przykłady: optymalizacja koncepcji wielostopniowej przekładni zębatej, wielocylindrowego silnika spalinowego, optymalizacja harmonogramu (planu operatywnego) produkcji albo optymalizacja innego procesu niecięgłego (np. ruchu pociągów).

6.2.4. Optymalizacja, gdy część informacji ma charakter rozmyty [80]

Niektóre elementy modelu matematycznego optymalizacji (informacji wejściowej dla działania 8, rys. 3.3 i 3.4) mogą mieć charakter rozmyty. Dotyczy to ocen (patrz p. 4.3), wymagań (p.3.4.2) lub współczynników wagi (p. 5.5.7).

Kontynuując uwagi p. 4.3 zauważmy, że rozmyte kryteria oceny (np. dyskomfort obsługi) mają zazwyczaj charakter kompleksowy, tzn. łączą kilka właściwości oraz opisują właściwości subiektywnie odczuwane przez człowieka, związane z jego percepcją fizyczną lub psychiczną lub niezdefiniowane pojęcia ekonomiczne. Kryteria trudno definiowalne lub nie dające się zdefiniować występują jednak rzadko i w zbiorze kryteriów oceny K stanowią zdecydowaną mniejszość. Podobnie jest ze współczynnikami wagi: prawdopodobnie łatwiej jest przeciętnemu respondentowi (ekspertowi) określić "ostro" wartość tych współczynników aniżeli narysować przebieg funkcji przynależności poszczególnych wag zdefiniowanych w sposób rozmyty. Jeżeli korzysta się z którejkolwiek metody wyznaczania współczynników wagi (patrz p. 5.5.7), trudność ta jest jeszcze większa, można więc uznać rozmyte wagi jako przypadek wyjątkowy.

W literaturze dotyczącej zbiorów rozmytych proponuje się modela optymalizacji, gdy wszystkie informacje wejściowe są rozmyte [8]. Jednak w projektowaniu technicznym typowy jest przypadek, gdy większość informacji jest ostra, a tylko mała część jest rozmyta.

W pracy [80] zaproponowano sposób formalnego ujęcia zadania optymalizacji wielokryterialnej z uwzględnieniem ocen i wag rozmytych, przy następujących założeniach:

- dany zbiór wariantów jest zbiorem skończonym: $D = \{d_v : v = \overline{1,V}\}$,
- zadaniowe kryterium optymalizacji F ma postać addytywną względem funkcji użyteczności (wzór 5.16),
- część kryteriów oceny $\{K_i : i = \overline{1,L}\}$ jest rozmyta: są to bądź zmienne lingwistyczne, bądź zmienne zdefiniowane ale oceniane w sposób rozmyty

(patrz p. 4.3); pozostałe kryteria $\{K_i : i = \overline{L+1,I}\}$ są zdefiniowane i oceny są ostre,

- dane są wszystkie funkcje użyteczności $\{u_i = u(k_i) : i = \overline{1,I}\}$: u_i : $[a_i, b_i] \rightarrow [0,1]$,
- dla każdego kryterium oceny K_i dany jest skończony repertuar ocen $P_i = \{P_{ij} : j = \overline{1,J_i}\}$, gdzie każda ocena P_{ij} jest sformalizowana za pomocą rozkładu funkcji przynależności: $P_{ij} \Rightarrow \mu_{ij}(k_i) : [a_i, b_i] \rightarrow [0,1]$,
- dla każdego wariantu rozwiązania dane są wszystkie oceny ze względu na wszystkie kryteria, oceniane w sposób rozmyty:

$$\bigwedge_{v \in [1,V]} \bigwedge_{i \in [1,L]} k_{iv} \rightarrow P_{ij}$$

lub w sposób ostry:

$$\bigwedge_{v \in [1,V]} \bigwedge_{i \in [L+1,I]} k_{iv}$$

Końcową wartość zadaniowego kryterium optymalizacji F dla wariantu d_v obliczamy jako sumę:

$$F_v = F_{rv} + F_{dv}, \tag{6.8}$$

gdzie F_{rv} i F_{dv} są odpowiednio składową rozmytą i składową ostrą.

Składowa ostra jest obliczana zgodnie z zasadami podanymi w rozdz. 5. Składową rozmytą wyznaczamy jako zbiór rozmyty, przy czym zależnie od sposobu podania współczynników wagi wyróżniamy dwa przypadki:

Przypadek 1. Wszystkie współczynniki wagi $\{w_i : i = \overline{1,I}\}$ podane są w sposób ostry. Składową rozmytą F_{rv} obliczamy następująco:

1) dokonujemy transformacji funkcji przynależności μ_{ij} poszczególnych ocen P_{ij} z przestrzeni wartości kryterium K_i, tj. $[a_i, b_i]$ do przestrzeni wartości funkcji użyteczności $[0, 1]$ (rys. 6.5), przeskalowujemy osie wartości $u_i(k_i)$ przez ich przemnożenie przez wartość odpowiednich współczynników wagi w_i:

$$u_i \rightarrow w_i \cdot u_i.$$

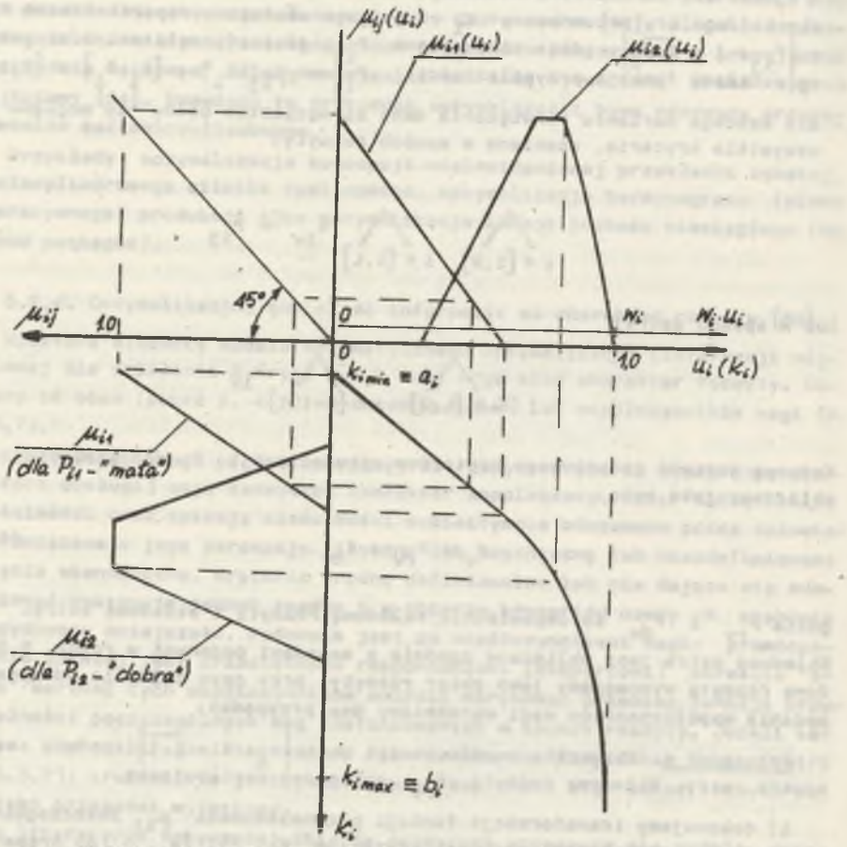
3) "składamy" oceny częstkowe wg reguły MAXIMIN:

$$\mu_v(F_{rv}) = \sup_{\substack{w_l u_l,\ w_t u_t \in U_F = [0,1] \\ w_l u_l + w_t u_t = F,}} \left\{ \min(1,\ \mu_{ln}(w_l u_l(k_l)) + \mu_{tn}(w_t u_t(k_t)) \right\} \tag{6.9}$$

gdzie: $l, t \in [1, L]$ są indeksami kryteriów oceny,

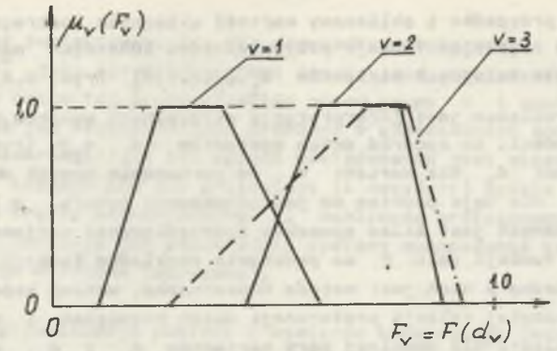
$m \in [1, J_l] = K_l$ są indeksami ocen,

$n \in [1, J_t] = K_t$ są indeksami ocen,



Rys. 6.5. Określanie funkcji przynależności $\mu_{ij}(u_i)$ ocen P_{ij} od funkcji użyteczności, na przykładzie ocen P_{i1} i P_{i2}

4) dla każdego wariantu d_v obliczamy wartość składnika ostrego F_{dv} wg wzoru jak w rozdz. 5 i przesuwamy wykresy $\mu_v(F_{rv})$ o tę wartość, otrzymując rozkłady funkcji przynależności końcowej wartości kryterium optymalizacji F.



Rys. 6.6. Przykład rozkładów funkcji przynależności wartości zadaniowego kryterium optymalizacji (funkcji celu) F dla trzech wariantów: d_1, d_2 i d_3

Przypadek 2. Jak przypadek 1 z tą różnicą, że współczynniki wagi dla lingwistycznych kryteriów oceny $\{K_i : i = \overline{1,L}\}$ są rozmyte: w_i, dane są poprzez skończone repertuary rozkładów $\{T_{iz} : z = \overline{1,Z_i}\}$ dla każdego współczynnika wagi $w_i : i = \overline{1,L}$. Dla tego przypadku część rozmytą F_{rv} określamy następująco:

1) transformujemy funkcje przynależności μ_{ij} poszczególnych ocen P_{ij} z przestrzeni $[a_i, b_i]$ do przestrzeni funkcji użyteczności $[0, 1]$ (jak na rys. 6.5),

2) "składamy" oceny rozmyte; dla określonego i-tego kryterium oceny K_i wg wzoru:

$$\mu_v(F_v^i) = \sup_{\substack{w_i \in W_i \\ k_i = U_i \\ w_i \cdot u_i(k_i) = F_v^i}} \left\{ \mu_{iz}(w_i) \cdot \mu_{ij}(u_i(k_i)) \right\} \qquad (6.10)$$

gdzie F_v^i - składnik funkcji celu F pochodzący od i-tego rozmytego kryterium oceny,

$j \in [1, J_i]$

$z \in [1, Z_i]$

3) składamy wszystkie składniki $F_v^i : i = \overline{1,L}$ wg wzoru (6.9), odpowiednio parami:

$$\mu_v(F_{rv}) = \sup_{i \in [1,L-1]} \left\{ \min(1, \mu_v(F_v^i) + \mu_v(F_v^{i+1})) \right\} \qquad (6.11)$$

4) jak dla przypadku 1 obliczamy wartość składnika ostrego F_{dv}, przesuwamy wykresy uzyskując funkcje przynależności końcowych wartości funkcji celu F dla kolejnych wariantów $d_1, d_2, \ldots, d_V$ (rys. 6.6).

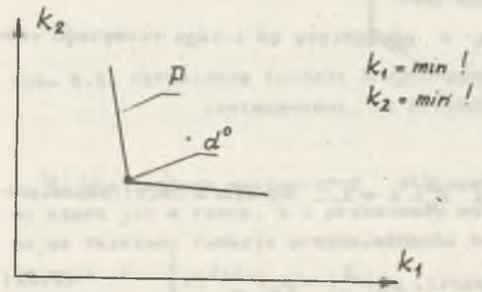
Kolejnym problemem jest interpretacja otrzymanych wyników. O ile nie może być wątpliwości, że spośród dwóch wariantów $\langle d_1, d_2 \rangle$ (rys. 6.6) lepszy jest wariant d_2 niż wariant d_1, to porównanie innych dwóch wariantów $\langle d_2, d_3 \rangle$ nie daje podstaw do jednoznacznego wyboru. W literaturze, np. w [8], podanych jest kilka sposobów uporządkowania wariantów ze względu na wartość funkcji celu F na podstawie rozkładów funkcji przynależności $\mu(F)$. Jedną z nich jest metoda Kwakernaaka, według której tworzy się pojęcie rozmytej relacji preferencji dwóch rozwiązań i wyznacza się wartość tej relacji dla dowolnej pary wariantów d_v i d_w na podstawie ich funkcji przynależności $\mu(F_v)$ i $\mu(F_w)$, która następnie daje podstawę uporządkowania zbioru wariantów $D = \{d_v : v = \overline{1,V}\}$.

6.2.5. Optymalizacja bez skalarnego kryterium optymalizacji

Jeśli z różnych względów nie da się utworzyć skalarnej funkcji celu F (działanie 6, rys. 3.3 i 3.4), ale ustalony jest zbiór kryteriów oceny K (działanie 2), wariant optymalny $d_0 \in D$ musi zostać znaleziony przy większym udziale intuicji.

Zakładamy przy tym, że ze względu na brak znajomości modelu matematycznego "nad-obiektu" (którego częścią składową jest projektowany przez nas obiekt) nie jest możliwe hierarchiczne postępowanie optymalizacyjne [42], [16]. Należy zatem zastosować jedną spośród metod grupy B (patrz rozdz. 3.5). Przegląd metod podano na przykład w [27] lub w [60]. Wybór metody zależy od tego, jaką informację można dodatkowo uzyskać od eksperta, np. o tym, jakie jest uporządkowanie kryteriów oceny wg ich ważności albo o tym, jakie jest rozwiązanie idealne, albo porównanie globalnej jakości w parach wariantów, albo o wzajemnej substytucji kryteriów itp.

Do najpopularniejszych metod należą między innymi:



Rys. 6.7. Przykładowy zbiór rozwiązań kompromisowych

- metoda koniunkcji podzbiorów rozwiązań [59], [27, s. 68],
- metoda leksykograficzna [27, s. 74], [59, s. 90],
- metoda dysjunkcji [27], szczególnie przydatna dla projektowania nietechnicznego,
- metoda punktu idealnego [1] lub programowania celowego [27].

Jeśli zbiór rozwiązań efektywnych P (patrz rozdz. 6.1) da się przedstawić graficznie, decydent może zdecydować się na wybór czysto subiektywny; np. dla przypadku pokazanego na rys. 6.7 wybór wariantu d^0 jako optymalnego jest intuicyjnie przekonywający.

Nie jest celem tej pracy przegląd metod grupy B i dyskusji ich właściwości, co już częściowo jest zrobione w odpowiednich monografiach. Trzeba jednak podkreślić, że ten sposób postępowania jest obiecujący i będzie rozwijany, szczególnie gdy projektant (i decydent) będzie miał dostęp do komputera w trybie konwersacyjnym i możliwość graficznego wyprowadzania informacji. Istnieją już odpowiednie systemy wspomagania komputerowego, np. system WEKTOR w TEKOMA (Warszawa).

6.2.6. Optymalizacja postaci i wymiarów konstrukcji jednocześnie

W literaturze niemal wyłącznie rozpatruje się przypadek optymalizacji, gdy dla wszystkich wariantów $d \in D$ obowiązuje jeden model matematyczny, nazywany modelem matematycznym obiektu. W kategoriach projektowania technicznego oznacza to, że w określonym zadaniu optymalizuje się: 1) albo strukturę (postać) obiektu, np. zasadę działania, układ połączeń itp.; ten przypadek bywa nazywany optymalizacją międzywariantową, 2) albo dla wcześniej przyjętej postaci konstrukcji (układu, zasady działania) szuka się optymalnych wymiarów; ten przypadek bywa nazywany optymalizacją parametryczną lub wewnątrzwariantową. Takie postępowanie wymaga wprowadzania uproszczeń i ocen globalnych, co w następstwie powoduje pogorszenie efektów optymalizacji (patrz rozdz. 3.2).

W pewnych przypadkach możliwe jest sformalizowanie zadania optymalizacji postaci i wymiarów konstrukcji jednocześnie.

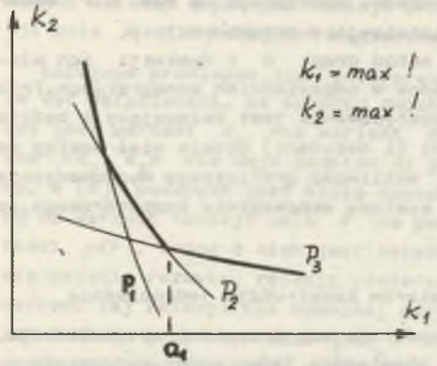
Przykład. Niech będą dwa kryteria oceny: K_1 i K_2, przy czym żądamy, aby $k_1 = max!$ i $k_2 = max!$, dwie zmienne decyzyjne X_1 i X_2 ciągłe i trzecia zmienna X_3 dyskretna, oznaczająca numer struktury obiektu, przyjmująca trzy stany: x_{31}, x_{32} i x_{33}. Model matematyczny obiektu dany jest osobno dla każdej struktury:

$$\left.\begin{aligned} f_1(k_1, k_2) &= 0 \quad \text{dla } x_3 = x_{31} \\ f_2(k_1, k_2) &= 0 \quad \text{dla } x_3 = x_{32} \\ f_3(k_1, k_2) &= 0 \quad \text{dla } x_3 = x_{33} \end{aligned}\right\} \qquad (a)$$

Dane są również związki:

$$\left.\begin{aligned} k_1 &= k_1(x_1, x_2, x_3) \\ k_2 &= k_2(x_1, x_2, x_3) \end{aligned}\right\} \qquad (b)$$

Dla tak sformułowanego zadania optymalizacji możemy znaleźć zbiory rozwiązań efektywnych dla każdej wartości x_3 osobno: P_1, P_2, P_3 (rys. 6.8)



Rys. 6.8. Zbiory wariantów efektywnych P_1, P_2 i P_3 dla trzech różnych struktur obiektu: x_{31}, x_{32} i x_{33} (przykład)

w przestrzeni celów. Łączny zbiór efektywny dla wszystkich wartości x_3 przedstawia linia pogrubiona. Jeśli zażądamy na przykład, aby wartośc $k_1 > a_1$, będzie to oznaczało, że należy zastosować strukturę trzecią ($x_3 = x_{33}$), a z układu rownań (b) określimy wartości pozostałych dwóch zmiennych decyzyjnych, uprzednio wyznaczywszy wartości optymalne k_1 i k_2.

Przykłady takiego ujęcia można znaleźc w pracach [44] lub [38].

6.3. Decyzja

Decyzja ma w tej pracy zawężone znaczenie terminologiczne. Rozumiemy ją jako końcowy akt postanowienia, zawsze intuicyjny, zatem zawsze wypełniany przez człowieka. Wszystkie działania poprzedzające, przygotowujące decyzję wyłączone są z tego działania (działania 1 do 8, rys. 3.4). Dotyczy to szczególnie tych działań, które można opisać formalnie i zalgorytmizowac, chocby w sposób heurystyczny. Przykładem jest wybór matematycznej postaci kryterium zadaniowego F (działanie 6), o ile zostaną sformułowane wystarczająco jednoznaczne reguły tego wyboru.

W przypadku decyzji kończącej proces wyboru decydent (projektant lub inna osoba) analizuje przebieg procesu wyboru i jego rezultaty, a w szczególności:

- ocenia poprawnośc całego procesu wyboru i jego poszczególnych etapów, zastosowane metody, przyjęte założenia, dokładność i wiarygodnośc danych wejściowych, dokładnośc działań i rezultatów itd.,
- ocenia, czy końcowe rezultaty są przekonywające.

Zatem pole możliwych decyzji jest tylko takie:

TAK - akceptuję otrzymane rezultaty,

STOP - należy przerwac dalsze prace tego procesu jako niecelowe, wymagana jest interwencja podmiotu projektowania nadsystemu,

NIE - należy powtórzyc niektóre działania danego procesu wyboru, decydent wskazuje które lub podaje zastrzeżenia.

Na przykład, dla przypadku optymalizacji metodą numeryczną na zbiorze wariantów o mocy continuum decydent oceni czy otrzymane rozwiązanie optymalne można uznac za dokładne rozwiązanie zadania optymalizacji. W przypadku optymalizacji na zbiorze skończonym oceni, czy znaleziony wariant optymalny jest wystarczająco przekonywająco "odległy" od następnego gorszego wariantu, biorąc pod uwagę dokładność informacji wejściowej i dokładnośc wykonanych operacji. Na przykład przy uproszczonej ocenie punktowej wariantów ze względu na niewiele kryteriów oceny, mając następujący zbior wartości: $F(d_1) = 0{,}81$, $F(d_2) = 0{,}79$, $F(d_3) = 0{,}56$ i $F(d_4) = 0{,}15$, nie można z przekonaniem stwierdzić, że wariant d_1 jest optymalny, gdyż różnica wartości kryterium zadaniowego F w stosunku do wariantu d_2 jest zbyt mała, biorąc pod uwagę niewielką dokładność danych wejściowych.

Jeśli rozwiązywano zadanie satysfakcji i znaleziono d_s, decydent oceni, czy nie będzie opłacalne podwyższenie wartości progowej F_s, przedłużenie czasu obliczeń optymalizacyjnych i próba uzalezienia wariantu lepszego w sensie wartości F.

W rzeczywistości w procesie wyboru podmiot tego procesu podejmuje również wcześniejsze decyzje pośrednie (nie uwidocznione wyraźnie na rys.3.3 i 3.4), w szczególności wykonując działania 1, 2, 4 i 6. Decyzja ma tym większe znaczenie, im oardziej działanie jest heurystyczne (np. 3 lub 6) a mniej algorytmiczne (np. 5 i 7). Wszystkie decyzje, a w szczególności ostatnia powodują, że proces wyboru jest najczęściej iteracyjny. Z reguły w działaniach heurystycznych nie da się sformalizowac warunków iteracji, więc możliwa jest ona tylko przez wprowadzenie do procedury procesu decyzji intuicyjnych.

7. ZAKOŃCZENIE

7.1. Praktyczne wykorzystanie proponowanej metodyki

Ważnym sposobem weryfikacji proponowanego modelu procesu wyboru były próby wykorzystania praktycznego. Przeprowadzono je na licznych przykładach.

Model wyboru dla przypadku zbioru wariantów skończonego, niezbyt licznego (rys. 3.4), wykorzystywano w pracach prowadzonych przez autora do wyboru koncepcji projektowanych urządzeń i ich podzespołów.

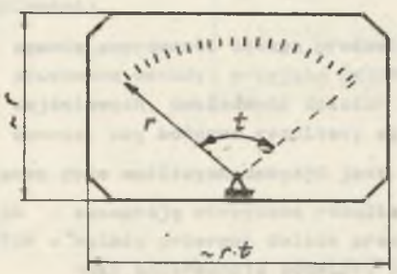
Najpełniejsze i najlepiej udokumentowane są dwa przykłady, w których proponowana powyżej metodyka legła u podstaw obszernych instrukcji wyboru, przygotowanych dla potrzeb dużych biur projektowych:

- instrukcja wyboru oferty w przypadku dużych i kosztownych obiektów w przemyśle hutniczym [100],
- instrukcja oceny jakości konstrukcji dźwigów samojezdnych w celu jej porównania z innymi konstrukcjami renomowanych firm światowych [99].

W instrukcjach tych uwzględniono losowość i rozmytość informacji o wybieranych wariantach i o systemie wartości.

Oprócz tego proponowana metodyka stosowana jest w pracach studentów i słuchaczy studiów podyplomowych.

Metodykę przewidzianą dla przypadku optymalizacji na zbiorze "ciągłym" (rys. 3.3) wykorzystano w licznych pracach konstrukcyjnych prowadzonych przez autora. Poniżej podano dwa przykłady ilustrujące te możliwości.



Rys. 7.1. Optymalizowane urządzenie wskazujące

Przykład 7.1. Należy znaleźć optymalne wymiary urządzenia wskazującego analogowego (rys.7.1) takie, aby długość podziałki L była maksymalna a gabaryt czołowy przyrządu G jak najmniejszy, przy ograniczeniach obustronnych na wszystkie wielkości.

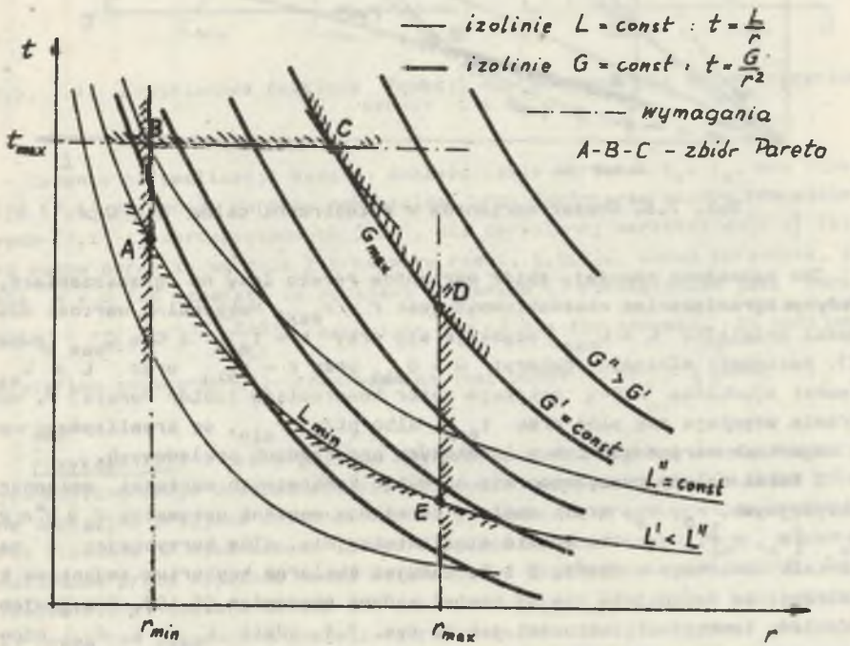
Ograniczmy się do dwóch zmiennych decyzyjnych: długości wskazówki r i maksymalnego kąta jej wychylenia t. Przyjmijmy następujący (uproszczony) model matematyczny obiektu:

$$\left.\begin{aligned} L &= r \cdot t \\ G &= L \cdot r = r^2 \cdot t \end{aligned}\right\} \qquad (7.1)$$

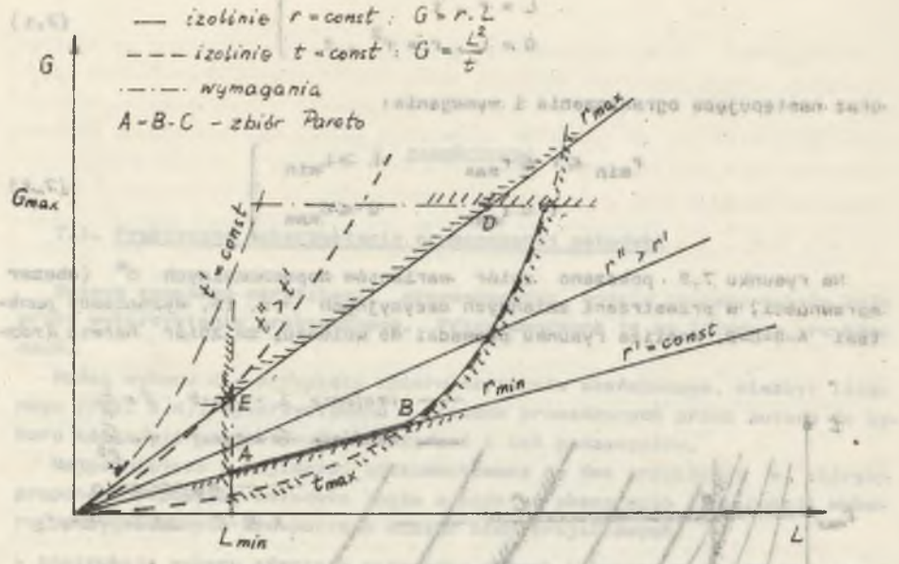
oraz następujące ograniczenia i wymagania:

$$\left.\begin{aligned} r_{min} \leq r \leq r_{max} \qquad & L \geq L_{min} \\ t \leq t_{max} \qquad & G \leq G_{max} \end{aligned}\right\} \qquad (7.2)$$

Na rysunku 7.2 pokazano zbiór wariantów dopuszczalnych D^x (obszar sprawności) w przestrzeni zmiennych decyzyjnych $<r, t>$, wyznaczony punktami A-B-C-D. Analiza rysunku prowadzi do wniosku, że zbiór Pareto (rozwiązań efektywnych) leży na brzegu obszaru sprawności D i wyznaczony jest punktami A-B-C (np. rozwiązania A i E mają tę samą wartość L, ale A ma lepszą - bo mniejszą - wartość G; warianty C i D mają tę samą wartość G, ale C ma lepszą - bo większą - wartość L, itd.). Rysunek 7.3 pokazuje te same zbiory wariantów w przestrzeni celów $<L, G>$.



Rys. 7.2. Obszar wariantów w przestrzeni zmiennych decyzyjnych $<r,t>$ (obszar sprawności - wnętrze figury A-B-C-D-E)



Rys. 7.3. Obszar wariantów w przestrzeni celów <L, G>

Jak zauważono powyżej, zbiór wariantów Pareto leży na ograniczeniach. Jedynym ograniczeniem nieefektywnym jest $r = r_{max}$. Maksymalną wartość długości podziałki $L = L_{max}$ uzyskuje się przy $t = t_{max}$ i $G = G_{max}$ (punkt C), natomiast minimalny gabaryt $G = G_{min}$ przy $r = r_{min}$ oraz $L = L_{min}$ (punkt A). Linia A-B-C pokazuje zbiór kompromisów (zbiór Pareto) P. Kompromis uzyskuje się albo przy t_{max}, albo przy r_{min}, co zrealizowano np. w zegarkach naręcznych lub w lotniczych przyrządach pokładowych.

Z kolei należy zdecydować się na wybór konkretnych wartości zmiennych decyzyjnych, r_o, t_o, czyli znaleźć określony wariant optymalny $d_o \in D^x \subset P$, $d_o = [r_o, t_o]$. Można to zrobić albo intuicyjnie, albo korzystając z materiału zawartego w rozdz. 5 i 6, budując skalarne kryterium zadaniowe F. Załóżmy, że decydujemy się na postać podaną równaniem (5.16). Przyjmujemy rozkłady funkcji użyteczności jak na rys. 7.4, gdzie L_{max} i G_{min} odpowiednio oznaczają takie wartości L i G, które w pełni satysfakcjonują konstruktora.

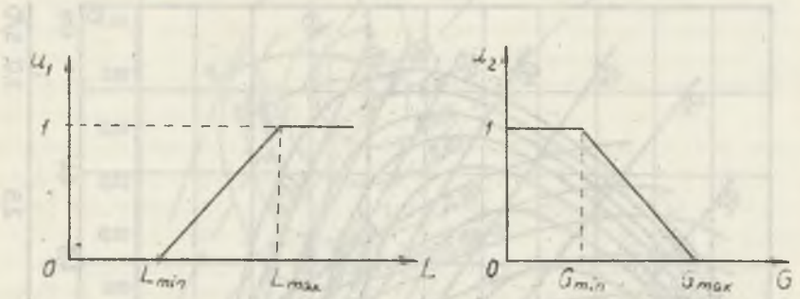
Przyjmijmy następującą postać zadaniowego kryterium optymalizacji:

$$F = w \cdot u_1(L) + (1 - w) \cdot u_2(G), \quad \text{gdzie} \quad w \in [0, 1]$$

$$u_1(L) = \frac{1}{L_{max} - L_{min}} (L - L_{min}); \quad \text{dla} \quad L \in [L_{min}, L_{max}] \tag{7.3a}$$

$$u_2(G) = 1 - \frac{1}{G_{max} - G_{min}} (G - G_{min}); \quad \text{dla} \quad G \in [G_{min}, G_{max}]. \tag{7.3b}$$

$$F = w \cdot \frac{L - L_{min}}{L_{max} - L_{min}} + \frac{G_{max} - G}{G_{max} - G_{min}} - w \cdot \frac{G_{max} - G}{G_{max} - G_{min}} \tag{7.4}$$

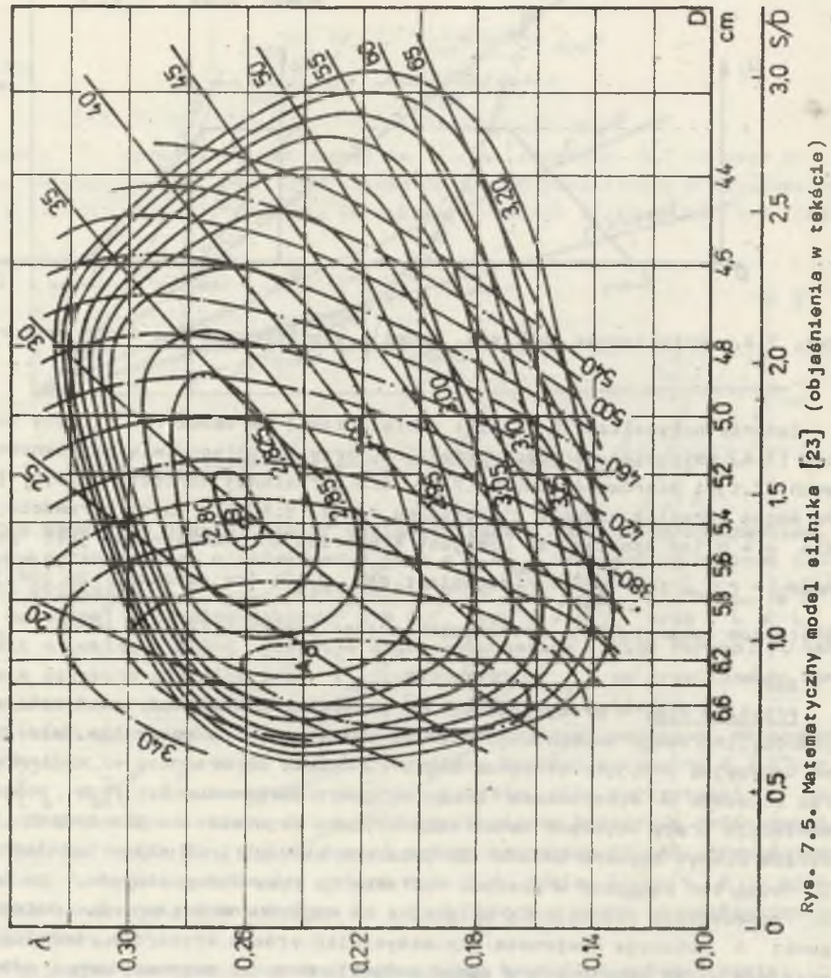


Rys. 7.4. Przykładowe rozkłady funkcji użyteczności dla dwóch kryteriów oceny: L i G

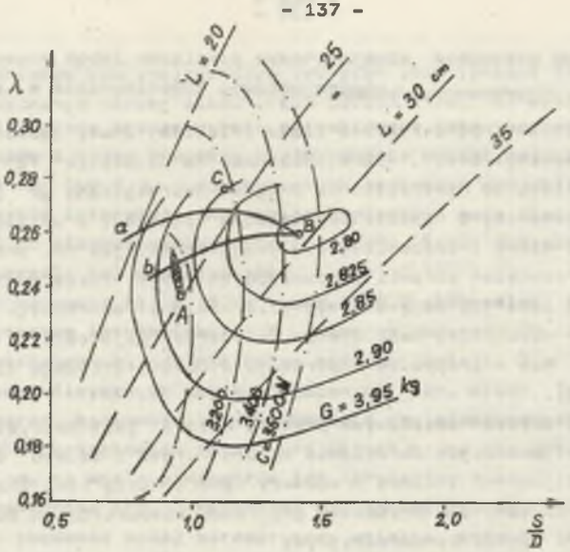
Zadanie optymalizacji będzie: znaleźć takie wartości r_o, t_o, aby funkcja (7.4) osiągnęła wartość maksymalną, przy spełnieniu więzów równościowych (7.1) i nierównościowych (7.2), dla określonej wartości $w \in [0,1]$ (którą można określić zgodnie z procedurą rozdz. 5.5.7). Łatwo sprawdzić, że dla $w = 0$ (co oznacza, że pomijamy kryterium L) rozwiązaniem jest punkt A ($r_o = r_{min}$, $t_o = \frac{L_{min}}{r_{min}}$), natomiast dla $w = 1$ (co oznacza, że pomijamy kryterium gabarytu G), rozwiązaniem jest punkt C ($r_o = \sqrt{\frac{G_{max}}{t_{max}}}$, $t_o = t_{max}$).

Przykład 7.2. W pracy [23, s. 70] przytoczono przykład optymalizacji jednocylindrowego dwusuwowego silnika spalinowego do motocykla. Jako zmienne decyzyjne przyjęto stosunek skoku S tłoka do średnicy D cylindra oraz stosunek λ wykorbienia r do długości korbowodu l. Przy znacznym nakładzie pracy uzyskano model matematyczny tego silnika dla trzech kryteriów oceny: ciężaru układu G, gabarytu układu L i siły bezwładności C. Model ten pokazano w postaci wykresów na rys. 7.5. Wskazano, że punkt B reprezentuje rozwiązanie optymalne ze względu na ciężar G, natomiast punkt A pokazuje kompromis dla wszystkich trzech kryteriów, intuicyjnie przyjęty przez konstruktora zanim znaleziono model matematyczny i sformułowano problem optymalizacji. Autor pracy [23] sugeruje, że punkt C byłby może lepszym kompromisem.

Zauważmy tu, że stosując metodykę proponowaną w niniejszej pracy, bez trudu można określić zbiór rozwiązań Pareto, który w tym przypadku leży między krzywymi "a" i "b" (rys.7.6), znalezionymi jako miejsce geometryczne punktów styczności izolinii, odpowiednio L i G oraz G i C. Racjonalny



Rys. 7.5. Matematyczny model silnika [23] (objaśnienia w tekście)



Rys. 7.6. Zbiór rozwiązań efektywnych (Pareto) silnika wg rys. 7.5

kompromis można by wskazać określając funkcje użyteczności $u_1(G)$, $u_2(C)$ i $u_3(L)$ oraz odpowiednie współczynniki wagi w_1, w_2, w_3, a następnie stosując wzór (5.16) lub (5.17). Zauważmy, że żadne z dwóch rozwiązań A i C nie należy do rozwiązań efektywnych, a zatem można wskazać cały zbiór rozwiązań rzeczywistych lepszych od tych dwóch ze względu na wszystkie kryteria jednocześnie. Dla przykładu pole zakreskowane na rys. 7.6 pokazuje zbiór wariantów bezwzględnie dominujących wariant A.

Na powyższym przykładzie pokazano, jakie oczywiste korzyści może przynieść graficzne przedstawienie explicité zbioru rozwiązań efektywnych. Innym przykładem może być przypadek pracy B. Kaczana pt. "Optymalizacja luzu i miejsca oparcia płytek w dwustronnym wzdłużnym łożysku ślizgowym" (materiały IX Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice - Wisła 1979, tom 1, s. 315), gdzie znaleziono model matematyczny, nie wyciągnięto jednak wniosków i nie wskazano rozwiązań polioptymalnych. Wystarczyło w tym celu znaleźć odpowiednie linie styczne.

Szczególnym przypadkiem wykorzystania proponowanego w tej pracy modelu procesu wyboru jest procedura optymalizacji wymagań konstrukcyjnych, podana przez autora w pracy w [81].

7.2. Główne właściwości proponowanego modelu

Właściwości proponowanej w niniejszej pracy metodyki wyboru są następujące:

1. Model jest ogólny, tzn. może być wykorzystany dla dowolnego rodzaju procesu projektowania (patrz rozdz. 2.3). Jeśli jednak ograniczyć się do węższej klasy zadań (np. określona klasa obiektów, znany odbiorca, określona wielkość produkcji itd.), można opracować na podstawie tej pracy prosty i niekłopotliwy do wykorzystania program heurystyczny w postaci instrukcji postępowania, o niewielkiej liczbie rozkazów, o ustalonym formacie informacji, łatwy i zrozumiały dla projektanta, jak np. instrukcja oceny i wyboru rozwiązań żurawii samochodowych [99]. Poszerzanie klasy obiektów, szczególnie gdy mogą one być przeznaczone do różnych zastosowań i w rozlicznych warunkach, powoduje szybki wzrost objętości i złożoności instrukcji, np. jak w przypadku instrukcji wyboru ofertowego dla obiektów hutniczych [100].

2. Większość działań składowych procesu wyboru jest heurystyczna (algorytmiczna jest selekcja, określanie zbioru Pareto i często optymalizacja, jeśli dane jest F). Zatem procedury wyboru muszą mieć charakter programów heurystycznych, a w przypadku programów komputerowych mogą być realizowane tylko w trybie konwersacyjnym.

3. Proponowany model może być wykorzystany w każdej fazie procesu projektowania (rozdz. 2.4.1): od najwcześniejszych, koncepcyjnych, do końcowych, konstrukcyjnych oraz do każdego zakresu zadań: dla zadań całościowych i dla zadań częściowych (rozdz. 2.4.3). Model pokazuje przesłanki racjonalnej dekompozycji zadań. Może być zastosowany zarówno do obiektów nowo projektowanych, jak i do prac modyfikacyjnych.

4. W ramach tej samej procedury wyboru zakres działań może być poszerzany lub zawężany, zależnie od ważności i dostępu do informacji w danym zadaniu wyboru, a więc zależnie od dokładności informacji wejściowej i żądanej dokładności informacji wyjściowej.

5. Proponowana metodyka nie implikuje żadnego systemu wartości: ani co do jego formy (może być sformułowany explicite - rozdz. 5 lub pośrednio - rozdz. 6.1), ani co do treści (patrz rozdz. 5). Zbiór atrybutów (rozdz.5.1) określany jest przez projektanta. Jednocześnie jednak formalizacja systemu wartości powoduje wzrost obiektywności decyzji.

6. Wykorzystanie proponowanej metodyki powoduje, że proces wyboru jest jawny, powtarzalny i zrozumiały. Dopuszcza współuczestnictwo różnych osób, także tych nie będących projektantami, umożliwia wykonanie dokumentacji wyboru. Rejestracja procesu wyboru umożliwia wyciąganie wniosków na przyszłość i uczenie się na błędach. Proponowany model ułatwia niedoświadczonym lub nieutalentowanym projektantom i decydentom uzyskanie poprawnych wyników projektowania. Umożliwia "wgląd" (śledzenie przebiegu procesu i jego kontrolę) procesu oceny, identyfikacji systemu wartości oraz optymalizacji.

7. Proponowany model zwiększa dokładność wyboru i wiarygodność decyzji, przy danej informacji wejściowej. Jednocześnie utrudnia podejmowanie decyzji arbitralnych, niezgodnych z intuicją projektanta, w przypadku niekompetentnych lub nieuczciwych decydentów.

8. Proponowany model umożliwia wykorzystanie komputera do wspomagania projektowania, w szczególności procesu wyboru.

W niniejszej pracy proces wyboru potraktowano jako autonomiczne działanie, powiązane z całym procesem projektowania swoimi wejściami (A, Ω, ϕ) i wyjściem (d_o lub d_s). W rzeczywistych procesach projektowania następują wcześniejsze interakcje: np. zbiór wariantów może ulec zmianie (np. powiększeniu) po sformułowaniu kryteriów oceny, kiedy projektant bardziej precyzyjnie określi cel projektowania.

Nawiązując do uwagi (1) i (3) w rozdz. 5.5.8 podkreślmy, że modele zadaniowego kryterium optymalizacji F (dane np. wzorami (5.16) i (5.17)) mają wtedy zastosowanie, gdy nie można napisać funkcji $F = F(k_1,\ldots,k_r)$ wychodząc z praw fizycznych czy ekonomicznych, tzn. wtedy, gdy F jest kosztem, ciężarem, sprawnością, dokładnością czy niezawodnością układu.

Częstokroć w początkowych fazach projektant stara się optymalizować obiekt ze względu na wiele parametrów (np. kryteriów oceny, jak ciężar, dokładność, niezawodność itp.), natomiast pod koniec procesu projektowania, gdy można już zbudować model matematyczny obiektu, stosuje jedno naturalne kryterium optymalizacji, a co najwyżej dwa lub trzy, resztę parametrów zamieniając na ograniczenia. W idealnym przypadku tym jednym kryterium jest koszt całkowity. Takie postępowanie wydaje się racjonalne, gdyż w początkowych fazach procesu projektowania nie jesteśmy w stanie określić precyzyjnie wartości ograniczeń, dlatego staramy się wszystkie parametry ekstremalizować.

Bywa, że znalezione rozwiązanie optymalne nie zostaje zaakceptowane przez praktykę. Przyczyny mogą być zawinione przez projektanta, na przykład:

1) w przypadku optymalizacji parametrycznej do opracowania modelu matematycznego przyjęto zły model fizyczny, np. układ o stałych skupionych zamiast układu o stałych rozłożonych,

2) nieadekwatny do rzeczywistości model matematyczny, tzn. niepoprawne warunki równościowe, niepoprawne warunki nierównościowe (szczególnie te, które są ograniczeniami efektywnymi), zbyt duże zapasy bezpieczeństwa wartości różnych współczynników w modelu, gdy nie są znane dokładne ich wartości, np. wytrzymałość tworzyw lub zbyt duże uproszczenie modelu w stosunku do rzeczywistości,

3) nieadekwatna do potrzeby funkcja celu F.

7.3. Główne elementy dorobku pracy

Oryginalnym dorobkiem pracy, zdaniem autora, jest między innymi:

- sformułowanie zadania wyboru na tle struktury procesu projektowania (także oryginalnej), z uwzględnieniem uwarunkowań i wymagań stawianych procesowi wyboru (rozdz. 3.1-3.4),

- zaproponowanie struktury procesu wyboru, wyróżnienie typowych działań tego procesu (rozdz. 3.6) i zdefiniowanie tych działań i niektórych pojęć,
- opracowanie (lub wskazanie istniejących już w innych dziadzinach) metod właściwych tym działaniom i podanie strategii wyboru metod (rozdz. 4, 5 i 6),
- zaproponowanie uogólnionej postaci zadaniowego kryterium optymalizacji F z wykorzystaniem funkcji preferencji (rozdz. 5.5.2), zaproponowanie funkcji preferencji jako uogólnienia znanej funkcji użyteczności na przebiegi niemonotoniczne (rozdz. 5.5.3), zaproponowanie sposobu określania funkcji preferencji w warunkach losowych (rozdz. 5.5.5 i 5.5.6), zaproponowanie sposobu określania współczynników wagi (rozdz. 5.5.7),
- wprowadzenie dynamicznego przekształcania kryterium optymalizacji: od kryterium pierwotnego ϕ_p do kryterium zadaniowego F (rozdz. 5.2) oraz dla kolejnych faz makrostruktury (rys. 5.1),
- zaproponowanie uogólnionego kosztu społecznego jako kryterium pierwotnego ϕ_p (rozdz. 5.3),
- pokazanie oceny w warunkach zakłóceń losowych (rozdz. 4.4) i w warunkach opisu częściowo rozmytego (rozdz. 4.3),
- uwypuklenie znaczenia polioptymalizacji (optymalizacji przy wielu kryteriach konfliktowych) w projektowaniu technicznym, pokazanie korzyści wynikających z dialogowego postępowania polioptymalizacyjnego (rozdz. 6.1),
- pokazanie sposobu interpretacji częstkowych ocen rozmytych oraz sposoby agregowania tych ocen do oceny ogólnej, wielokryterialnej dla dwóch przypadków: gdy rozmyte są tylko oceny i gdy rozmyte są oceny i współczynniki wagi ze względu na niemierzalność danego kryterium oceny,
- analiza struktury procesu projektowania oraz synteza trzech standardowych modeli tej struktury (rozdz. 2.4),
- klasyfikacja zadań projektowych (rozdz. 2.3),
- klasyfikacja zadań wyboru (rozdz. 3.7).

7.4. Zakres przyszłych prac

Do opracowania naukowego pozostały między innymi następujące zagadnienia:

1. Opracowanie heurystycznych metod przekształcania kryteriów optymalizacji: kryterium nadrzędnego ϕ w kryterium zadaniowe F, kryterium zadaniowego F w kryteria zadaniowe F_n, $n = \overline{1,N}$ przy dekompozycji zadania Z w zbiór zadań częściowych Z_n, $n = \overline{1,N}$ oraz metod określania kryteriów zadaniowych F^m dla kolejnych faz makrostruktury $m = \overline{1,M}$, przy czym chodzi tu o przypadek braku modelu matematycznego optymalizowanego obiektu. Przypadkowi przeciwnemu poświęcono kilka prac, między innymi [16] i [42].

2. Stworzenie dostatecznie prostych metod obliczania kosztów, możliwych do wykorzystania przez projektanta w różnych fazach projektowania, tak aby ogólny koszt mógł być kryterium optymalizacji zamiast innych arbitralnie dobranych sformułowań w przypadku kryterium nadrzędnego lub zamiast kryterium zadaniowego, jeśli nie ma ono interpretacji fizycznej lub ekonomicznej.

3. Uporządkowanie różnych spotykanych w literaturze ogólnych zasad optymalizacji i włączenie ich do proponowanego w tej pracy modelu.

4. Opracowanie dostatecznie prostych metod prognozowania, ułatwiających ocenę probabilistyczną z określoną dokładnością.

5. Opracowanie przekonywających metod oceny ze względu na kryteria rozmyte, w szczególności metod określania funkcji przynależności.

6. Zaproponowanie metody określania wykładników α_i, $i = \overline{1,I}$ we wzorze (5.17) oraz metody określania współczynnika wagi w_i dla przypadku niemonotonicznego przebiegu funkcji preferencji.

7. Przeprowadzenie dowodu, że dwie przytoczone w pracy postacie sztucznego skalarnego kryterium optymalizacji F (wzory 5.16 i 5.17) są adekwatne do spotykanych w projektowaniu technicznym sformułowań kryterium nadrzędnego ϕ i że są dostatecznie ogólne.

8. Doskonalenie metod polioptymalizacji grupy B (rozdz. 3.5 i 6.2.5) tak, aby były zrozumiałe dla projektanta, nie wymagały szybkich komputerów z dużą pamięcią operacyjną i rozbudowanymi urządzeniami graficznymi i aby pozostawiały nieduży margines dla intuicji użytkownika, tzn. aby nie wymagały konieczności podejmowania wielu istotnych subiektywnych decyzji. W tej pracy metody te potraktowano bardzo lakonicznie, odsyłając Czytelnika do opracowań monograficznych, np. [27] i [60].

9. Opracowanie strategii procesu polioptymalizacji dla przypadku wykorzystania metod grupy B.

10. Rozwinięcie pomysłu podanego w p. 6.2.6 jednoczesnej optymalizacji struktury i parametrów konstrukcji.

11. Określenie warunków, po spełnieniu których można liczyć na wiarygodne i stabilne wypowiedzi eksperta (respondenta) w zakresie funkcji użyteczności (rozdz. 5.5), zbioru rozwiązań równocennych (rozdz. 5.5.7) oraz funkcji przynależności (rozdz. 4.3 i 6.2.4).

12. Analiza problemu dokładności informacji w poszczególnych działaniach procesu wyboru oraz jej wpływu na jednoznaczność uporządkowania danego zbioru wariantów A ze względu na kryterium optymalizacji F. Należy zbadać, jak algorytm powinien zależeć od żądanej dokładności wyboru oraz zaproponować miarę tej dokładności.

13. Dowieść (np. statystycznie, na większej populacji próbki), że rezultaty procesu wyboru otrzymane proponowaną metodą są lepsze niż gdyby postępować intuicyjnie. Taki eksperyment jest bardzo trudny do przeprowadzenia i nie jest nawet jasne, jakie założenia należałoby sformułować.

14. Opracować metodę określania, czy dany zbiór kryteriów oceny $K = \{K_i : i = \overline{1,I}\}$ spełnia warunek wzajemnej niezależności kryteriów (rozdz. 4.2) dla przypadku, gdy nie można zastosować znanych metod statystycznych (np. analizy czynnikowej).

LITERATURA

[1] Ameljańczyk A.: Metoda punktu idealnego w rozwiązywaniu zadań optymalizacji. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Automatyka, Nr 760, zeszyt 67, Gliwice 1983, ss. 7-16.

[2] Bąbiński Cz.: Elementy nauki o projektowaniu. WNT, Warszawa 1972.

[3] Bojarski W.: Koncepcja optymalizacji systemowej zespołu cech wytworu technicznego. Materiały II Konferencji Metodologii Projektowania. PWN, Warszawa 1974.

[4] Borys T.: Elementy teorii jakości. PWN, Warszawa 1980.

[5] Bosiakowski Z. (red.): Ekonomiczne problemy sterowania jakością. PWE, Warszawa 1980.

[6] Cohon H.: Multiobjective Programming and Planning. Academic Press, New York, San Francisco, London, 1978.

[7] Cross N., Roy R.: Design Methods Manual. The Open University Press, Walton Hall, Milton Keynes, 1976.

[8] Czogała E., Pedrycz W.: Elementy i metody teorii zbiorów rozmytych. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 89, Gliwice 1980.

[9] Czogała E.: Problemy podejmowania decyzji w rozmyto-probabilistycznych warunkach niepewności. Materiały XXI Sympozjonu "Modelowanie w Mechanice", PTMTiS, oddz. Gliwice, Gliwice 1982, s. 515.

[10] Dąbrowski J.: Rozważania o modelu spożycia. IW CRZZ, Warszawa 1975.

[11] Dietrych J.: Projektowanie i konstruowanie. WNT, Warszawa 1974.

[12] Dietrych J.: System i konstrukcja. WNT, Warszawa 1978.

[13] Dorosiński W.: Metoda wyboru przedmiotu projektowania inżynierskiego szczegółowego. Praca dokt. pod kier. W. Gasparskiego, Warszawa 1973.

[14] Dorosiński W.: Wybór w projektowaniu wstępnym. PWN, Warszawa 1977.

[15] English J.M. (editor): Cost - Effectiveness. John Wiley, New York, London, Sydney, Toronto, 1968.

[16] Findeisen W.: Wielopoziomowe układy sterowania. PWN, Warszawa 1974.

[17] Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A.: Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji. PWN, Warszawa 1977.

[18] Fox R.L.: Optimization Methods for Engineering Design. Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1971.

[19] Gasparski W.: Jakość wytworu w ujęciu prakseometrycznym. Prakseologia, Nr 32, 1969, s. 57.

[20] Gasparski W.: Projektowanie w systemie działań [w:] Metodologia projektowania inżynierskiego. PWN, Warszawa 1973 (pod red. W. Gasparskiego), ss. 203-218.

[21] Gasparski W.: Projektowanie - koncepcyjne przygotowanie działań. PWN, Warszawa 1978.

[22] Gasparski W.: Kryteria i metoda wyboru rozwiązania technicznego w ujęciu prakseometrycznym [w:] Z zagadnień metodologii projektowania. PWN, Warszawa 1970.

[23] Goliński J.: Metody optymalizacyjne w projektowaniu technicznym. WNT, Warszawa 1974.

[24] Harrington E.C., Jr.: Desirability Function. Industrial Quality Control, 1965, ss. 494-498.

[25] Heinrich W. (red.): Grundsätze und Hinweise zur Entwiclung volkswirtschaftlich optimaler Erzeugnisse. Institut für Leichtbau, schriftenreihe "Materialökonomie" Nr 34, Dresden 1981.

[26] Hill P.H.: The Science of Engineering Desing. Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1970.

[27] Hwang Ch.L., Yoon K.: Multiple Attribute Decision Making (Methods and Applications). Springer - Verlag, Berlin, New York 1981.

[28] Jones J.Ch.: Metody projektowania. WNT, Warszawa 1977.

[29] Juran J.M., Gryna F.: Jakość - projektowanie, analiza. WNT, Warszawa 1974.

[30] Kaufmann A., Fustier M., Drevet A.: Inwentyka. Metody poszukiwania twórczych rozwiązań. WNT, Warszawa 1975.

[31] Keeney R., Raiffa H.: Decisions with Multiple Objectives.Preferences and Value Tredeoffs. Wiley, New York 1976.

[32] Kiliński A.: Jakośc. WNT, Warszawa 1979.

[33] Kolman R.: Ilościowe określanie poziomu nowoczesności projektów.Przegląd Mechaniczny, nr 23, 1976, s. 797.

[34] Kolman R.: Sterowanie jakością wytwarzania. Skrypt Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1977.

[35] Konarzewska-Gubała E.: Programowanie przy wielorakości celów.PWN,Warszawa 1980.

[36] Kozielecki J.: Psychologiczna teoria decyzji. PWN, Warszawa 1977.

[37] Krick E.: Wprowadzenie do techniki i projektowania technicznego.WNT, Warszawa 1971.

[38] Kusidło K.: Metoda jednoczesnego wyboru struktury konstrukcji i jej cech konstrukcyjnych. Materiały XXII Sympozjonu "Modelowanie w Mechanice", PTMTiS, Oddz. Gliwice, Gliwice 1983, s. 469.

[39] Lenkiewicz W., Machowski B.: Analiza zakresów stosowania algorytmów projektowych [w:] Prace Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej: "Automatyzacja prac projektowych", Nr 29/7, Wrocław 1975, s. 189.

[40] Łukasiak-Goszczyńska M.: Decyzje wielowymiarowe i strategie ich podejmowania. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wydawn. PAN, Wrocław 1977.

[41] McHarg I.: Design with Nature. Natural History Press, New York 1969.

[42] Mesarowicz M.D., Macko D., Takahara Y.: Theory of Hierarchical Multilevel Systems, Academic Press, New York 1970.

[43] Misiakiewicz J., Tarnowski W.: Graficzna metoda polioptymalizacji z zastosowaniem autokreślarki. Zeszyty Naukowe AGH, seria Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa, Nr 857, Kraków 1981.

[44] Misiakiewicz J.: O sposobach przedstawiania zbioru rozwiązań niezdominowanych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr 760,seria Automatyka, nr 67, Gliwice 1983, ss. 51-60.

[45] Mitchell G.H. (ed.): Operational Research: Techniques and Examples. The English Univ. Press, Ltd., London 1972.

[46] Moore P.G.: Ryzyko w podejmowaniu decyzji. PWE, Warszawa 1975.

[47] Nykowski I.: Programowanie liniowe. PWE, Warszawa 1980 (rozdz.9.4).

[48] Oleksiuk W.: Zagadnienie doboru optymalnych przełożeń częstkowych dla reduktorów zębatych. Pomiary, Automatyka, Kontrola, Nr 12, 1964, s. 549.

[49] Osgood Ch.E. i inni: The Measurement of Meaning.University of Illinois Press, Urbana, 1957.

[50] Osiński Z., Wróbel J.: Teoria konstrukcji maszyn. PWN, Warszawa 1982.

[51] Oyrzanowski B., Wasilewski L.: Postęp techniczny w przedsiębiorstwie. Ekonomista, nr 2, 1971.

[52] Pedrycz W.: Działania na zbiorach i liczbach rozmytych - przykłady i zastosowania. Zeszyty Nauk. Polit. Śląskiej, nr 760,seria Automatyka nr 67, Gliwice 1983, ss. 83-94.

[53] Peschel M., Riedel C.: Polioptymalizacja. WNT, Warszawa 1979.

[54] Rohatyński R. i inni: Algorytmizacja nowych metod projektowania układów hydraulicznych. Część 7: Algorytmy i procedury oceny rozwiązań. Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechn. Wrocławskiej, Raport Nr 339, Wrocław 1976.

[55] Rudniański J.: Homo Cogitans. Wiedza Powszechna, Warszawa 1975.

[56] Sage A.P.: Methodology for Large Scale Systems. McGraw-Hill Co., New York 1977.

[57] Seidler J., Badach A., Molisz W.: Metody rozwiązywnia zadań optymalizacji. WNT, Warszawa 1980.

[58] Siddal J.N.: Analytical Decision - Making in Engineering Design.Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1972.

[59] Sielicki A., Jeleniewski T.: Elementy metodologii projektowania technicznego. WNT, Warszawa 1980.

[60] Słowiński R.: Metody wielokryterialnego programowania liniowego,próba syntezy. Materiały XXI Sympozjonu "Modelowanie w Mechanice",PTMTiS, Oddz. Gliwice, Gliwice 1982, ss. 389-424.

[61] Słowiński R.: Modelowanie preferencji w wielokryterialnych problemach decyzyjnych. Zeszyty Nauk. Politechniki Śląskiej Nr 760, seria Automatyka nr 67, Gliwice 1983, ss. 95-112.

[62] Strzałecki A., Targowska M.: Struktura znaczeniowa pojęcia nowego rozwiązania wynalazczego (wyniki badań empirycznych) [w:] Problemy metodologii projektowania. PWN, Warszawa 1977.

[63] Tarnowski W.: Kryteria optymalizacji konstrukcji. Pomiary, Automatyka, Kontrola, nr 3, 1974, ss. 120-121.

[64] Tarnowski W.: Błędy mechanicznych przyrządów pomiarowych i elementów automatyki. Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 1975.

[65] Tarnowski W.: Kryteria oceny a kryteria optymalizacji w procesie konstrukcyjnym. Zeszyty Nauk. Politechniki Śląskiej, seria Automatyka, zeszyt 36, Gliwice 1976, ss. 19-30.

[66] Tarnowski W.: Wybór optymalnej koncepcji konstrukcji [w:] Materiały XV Sympozjonu "Optymalizacja w Mechanice". PTMTiS, Oddz.Gliwice,Gliwice 1976, ss. 465-476.

[67] Tarnowski W.: Ocena technologiczności konstrukcji. Przegląd Mechaniczny, Nr 10, 1977, ss. 333-336.

[68] Tarnowski W.: Systemowe projektowanie urządzeń automatyki na tle ogólnej metodologii projektowania. Materiały VII Krajowej Konferencji Automatyki, tom I, ss. 542-549, Rzeszów 1977.

[69] Tarnowski W.: Metody poszukiwania nowych rozwiązań. Materiały Międzynarodowej Kursokonferencji Naukowej "Analiza Wartości", TNOiK, Wrocław 1978, ss. 258-268.

[70] Tarnowski W.: Określanie zbioru rozwiązań nieulepszalnych (Pareto) w procesie optymalizacji w projektowaniu. Materiały IX Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice-Wisła 1979, zeszyt 34/68, tom I,ss. 223-232.

[71] Tarnowski W.: General Model and Choice Criterion in Engineering Design. Design Studies, vol. 1, no 1, July 1979, pp. 45-48.

[72] Tarnowski W.: Sposób doboru metody poszukiwania rozwiązań w projektowaniu technicznym. Materiały I Kraj. Konferencji "Nowoczesne Metody Projektowania" cz. III, Jaworzyn-Książ 1980, ss. 185-190.

[73] Tarnowski W.: Ogólna metodyka racjonalnego wyboru w procesach projektowania. Materiały I Kraj. Konferencji "Nowoczesne Metody Projektowania", cz. I, Jaworzyn-Książ 1980, ss. 125-137.

[74] Tarnowski W.: Formalizacja pojęcia jakości kompleksowej z uwzględnieniem opisu probabilistycznego. Zeszyty Nauk. Politechniki Śląskiej nr 850, seria Automatyka zeszyt 64, Gliwice 1980, ss. 161-172.

[75] Tarnowski W.: A Proposal for the Comples Probabilistic Quality Measure. Proceedings of the 24-th Congress of the ICAO, Part 3, Warszawa 1980, pp. 469-481.

[76] Tarnowski W.: Algorytmy wyboru w projektowaniu. Instrukcja wyboru ofertowego i wyboru koncepcji rozwiązania. Praca nauk.-bad. wykonana w Instytucie Automatyki Pol. Śląskiej na zlecenie BIPRUHUTU (stron 78), Gliwice 1980.

[77] Tarnowski W.: Optymalizacja a etapowość i hierarchiczność procesu projektowania. Materiały XX Sympozjonu "Modelowanie w Mechanice", PTMTiS Oddz. Gliwice, Gliwice-Wisła 1981, ss. 389-397.

[78] Tarnowski W.: Formalization of the Multi - Attribute Value System in Probabilistic Terms. Design Studies, vol.2, no 1, 1981, pp. 41-44.

[79] Tarnowski W.: Struktura procesu projektowania. Przegląd Mechaniczny, nr 1-7, 1982, ss. 5-9.

[80] Tarnowski W., Wacławek M.: Optymalizacja wielokryterialna w obecności ocen rozmytych. Zeszyty Nauk. Polit. Śląskiej, nr 760, seria Automatyka, zeszyt 67, Gliwice 1983, ss. 121-134.

[81] Tarnowski W.: Optymalizacja jakości i kosztów w projektowaniu wstępnym. Postępy Cybernetyki Nr 3-4, 1983.

[82] Toffler A.: Szok przyszłości. PIW, Warszawa 1974.

[83] Tomaszewski A.: Sterowanie jakością produkcji maszyn i urządzeń. WNT, Warszawa 1977.

[84] Warszyński M.: Optymalizacja decyzji mechanizacji prac uciążliwych oraz wyboru koncepcji urządzenia. Zeszyty Nauk. AGH, seria Elektryfikacji i Mechanizacji Górn. i Hutnictwa, Kraków 1977, ss. 199-211.

[85] Wasilewski L.: Metody kontroli jakości. PWE, Warszawa 1974.

[86] Wasiutynski Z.: O analizie efektów użytkowych w technice. PWN, Warszawa 1962.

[87] Wesołowski J.: Programowanie nowej techniki. PWN, Warszawa 1975.

[88] Wierzbicki A.: Metody optymalizacji przy wektorowych wskaźnikach jakości. Sprawozdanie z realizacji zadania badawczego I.2.03.1, Instytut Automatyki Polit. Warszawskiej, Warszawa 1976.

[89] Wiggins L.L.: Use of Statistical Methods to Measure Peoples Subjective Responses to Urban Spaces. DMG-DRS Journal, vol. 7, no 1, 1973, pp. 1-10.

[90] Wilson I., Wilson M.: From Idea to Working Model. John Wiley and Sons, Inc., 1970.

[91] Wise J.A.: Decision Theory and Design Methodology. Niepublik. referat na sesji nauk. "Metodologia projektowania i badania pokrewne nad projektowaniem", Komitet Naukoznawstwa PAN, Radziejowice 1977.

[92] Nowak L.: Zasady marksistowskiej filozofii nauki. PWN, Warszawa 1974.

[93] Szaniawski K.: Metoda i twórczość w nauce. Zagadnienia Naukoznawstwa, t. IX, z. 2 (34), Warszawa 1973.

[94] Szaniawski K.: Metodologia prac badawczych. Wydawn. Ośrodka Postępu Techn. Katowice 1975.

[95] Ajdukiewicz K.: Logika pragmatyczna. PWN, Warszawa 1974.

[96] Tarnowski W.: Engineering Design as a University Subject. SEFI-FEANI International Congress on Engineering Education and New Professional Requirements. Padua 1978.

[97] Ameljańczyk A.: Elementy optymalizacji wielokryterialnej (zeszyt 1 i 2). Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1981 (na prawach rękopisu).

[98] Zieleniewski J.: Organizacja i zarządzanie. PWN, Warszawa 1969.

[99] Tarnowski W., Misiakiewicz J.: Metodyka i algorytmy oceny i wyboru rozwiązań żurawii samochodowych. Sprawozd. z pracy nauk.-badawczej. Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej, Gliwice 1983 (niepublikowane).

[100] Tarnowski W.: Algorytmy wyboru w projektowaniu. Projekt instrukcji wyboru ofertowego. Sprawozd. z pracy nauk.-badawczej. Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej, Gliwice 1979 (niepublik.).

[101] Pogorzelski W.: Optymalizacja układów technicznych w przykładach. WNT, Warszawa 1978.

UOGÓLNIONY MODEL WYBORU W PROJEKTOWANIU TECHNICZNYM

S t r e s z c z e n i e

Praca jest poświęcona procesowi wyboru w projektowaniu technicznym, w różnych fazach tego procesu: od koncepcyjnej do konstruowania szczegółowego, przy czym wybór może dotyczyć konstrukcji całego obiektu lub jego części, systemu projektującego lub samej procedury projektowania.

W dostępnej literaturze (p. 1.2) brak uogólnień metodologicznych dotyczących procesu wyboru: brak teorii, brak odpowiednich metod. Celem pracy jest zaprojektowanie ogólnego modelu procesu wyboru, ważnego dla przypadku, gdy informacja wejściowa dana jest w postaci trojki $<A, \Omega, \phi>$, gdzie A jest zbiorem wariantów, Ω zbiorem wymagań a ϕ informacją o systemie wartości, przy czym informacja ta może być niepełna lub dana w formie opisowej (rozmytej). W procesie wyboru tej wstępnej informacji należy nadać postać matematycznego modelu zadania optymalizacji, tzn. należy zdefiniować zmienne i przy ich pomocy sformułować wymagania oraz funkcję celu (kryterium optymalizacji).

W części wstępnej pracy sformułowano cel pracy, dokonano przeglądu literatury i stanu praktyki i scharakteryzowano samą pracę i uzyskane wyniki. Podano też minisłownik używanych terminów oraz objaśnienia symboli we wzorach oraz na schematach.

W rozdziale 2 dokonano analizy procesu projektowania ze względu na potrzeby tej pracy. Pokazano proces projektowania jako jeden z elementów procesu zaspokajania potrzeb ludzkich i wynikające stąd konsekwencje dla formułowania systemu wartości. Przedyskutowano systematykę zadań wyboru. Zbadano również strukturę procesu projektowania i zaproponowano trzy komplementarne modele tej struktury; na tym tle wskazano miejsca w sieci działań opisującej proces projektowania, gdzie występują zadania wyboru oraz decyzje i jakie są ich zewnętrzne uwarunkowania.

W rozdziale 3 sformułowano zadanie wyboru oraz zamieszczono jeden z głównych elementów pracy: propozycję struktury procesu wyboru. Scharakteryzowano zmienne, przy pomocy których formalizuje się zbiór wariantów i zbiór wymagań, przedyskutowano konsekwencje wynikające z faktu, że proces projektowania jest etapowy i należy podejmować decyzje pośrednie oraz z faktu, że zadania projektowe dzieli się na niezależne podzadania. Dokonano przeglądu literatury ze względu na różne ujęcia zadania wyboru i dokonano klasyfikacji zadań wyboru. Zaproponowano dwa charakterystyczne modele procesu wyboru.

Rozdział 4 poświęcono problematyce formułowania modelu matematycznego zbioru wariantów, tzn. zbioru formalnych związków między wartościami zmiennych decyzyjnych a wartościami właściwości (kryteriów oceny) i kryteriów optymalizacji, w szczególności gdy informacje o tych związkach są probabilistyczne lub rozmyte.

Rozdział 5 jest ważną częścią pracy, gdyż pokazano w nim metodykę formalizacji systemu wartości zmierzającą do nadania mu końcowej postaci formalnego kryterium optymalizacji. Zaproponowano różne matematyczne postacie tego kryterium mające różne własności, uwzględniono też losowość i rozmytość elementów systemu wartości, formalizując je i włączając do kryterium optymalizacji. Podano też odpowiednie metody.

W rozdziale 6 zwrócono uwagę na pewne osobliwości optymalizacji w przypadku projektowania technicznego oraz zwrócono uwagę na doniosłość polioptymalizacji, ilustrując przykładami, dla różnych rodzajów optymalizacji. Pokazano graficzną metodę polioptymalizacji, w przypadku gdy jedna z dwu zmiennych decyzyjnych jest dyskretna.

Podsumowaniem pracy jest (obok p. 1.4) rozdz. 7: pokazano przykłady wykorzystania praktycznego proponowanego modelu procesu wyboru, główne właściwości tego modelu oraz wskazano oryginalne jego elementy. Zaproponowano też zakres przyszłych prac teoretycznych nad metodyką wyboru.

Proponowany w niniejszej pracy model procesu wyboru może być wykorzystany do formalizacji tego procesu (np. dla celów wspomagania komputerem), w procesie nauczania projektowania, do tworzenia szczegółowych algorytmów lub programów heurystycznych wspomagających wybór i decyzję, może stać się podstawą tworzenia nowych metod szczegółowych, może być bazą wyjściową do dalszych badań teoretycznych.

Przedstawiony w pracy materiał ma charakter elementów teorii wyboru, w szczególności w projektowaniu technicznym.

ОБОБЩЁННАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА В ТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Р е з ю м е

Данная работа посвящена рассмотрению процесса выбора в техническом проектировании, в разных стадиях этого процесса: от концепционной к детальному конструированию, при чём выбор может охватывать конструкцию всего объекта либо его части, проектируемой системы или самого процесса проектирования.

В имеющихся литературных источниках (пкт. 1.2) нет методологических обобщений, касающихся процесса выбора: нет теории, нет соответствующих методов. Целью работы является получение общей модели процесса выбора для случая, когда входная информация даётся в виде определённой тройки величин $\langle A, \Omega, \phi \rangle$, где A это множество вариантов, Ω – множество требований, ϕ – информайия о системе оценивания, при чём информация эта может быть неполной или дана в описательной форме (расплывчатой). В процессе выбора эту начальную информацию необходимо привести к виду математической модели оптимализационной задачи, т.е. необходимо определить переменные и с их помощью определить требования а также целевую функцию (оптимализационный критерий).

Во вступительной части определена цель работы, оговорены имеющиеся литературные источники и состояние практики в этом отношении, дана характеристика работы и полученных результатов. Дан также список терминов и пояснены употребляемые символы в формулах и на схемах.

Во 2-ой части дан анализ проектного процесса исходя из требований данной работы. Процесс проектирования представлен как один из элементов общего процесса обеспечения человеческих потребностей и вытекающие из этого последствия для формулировки системы оценивания. Оговорена систематика задач выбора. Исследовано также структуру процесса проектирования и получены три комплементарные модели этой структуры. Исходя из этого в сети действий, описывающей процесс проектирования, указаны точки где выступают задачи выбора и решения и их внешняя обусловленность.

В 3-ей части определена задача выбора а также представлен один из ведущих элементов работы, а именно: предложена структура процесса выбора. Оговорены последствия вытекающие из факта, что процесс проектирования является этапным и необходимо принимать промежуточные решения а также из факта, что проектная задача разделяется на независимые подзадачи.

Просмотрены литературные источники с точки зрения имеющихся при описаниях задачи выбора и приведена классификация задач выбора. предложены две характерные модели процесса выбора.

Часть 4-ая внимает проблематику формулирования математической модели для множества вариантов, т.е. множества формальных зависимостей между значениями решающих переменных а значениями свойств (критериев оценок) и оптимализационных критериев в частности, когда информация об этих связях является вероятностной либо расплывчатой.

В главе 5-ой помещена важная часть работы, ибо показана в ней методика описания системы оценивания, ведущая к определению окончательного вида формального критерия оптимализации. Предложены разные виды математического описания этого критерия, характеризующиеся разными свойствами. Учтена также случайность и расплывчатость элементов системы оценивания в виде математических зависимостей для оптимализационных критериев. Даны также соответствующие методы.

В части 6-ой работы обращено внимание на некоторые особенности оптимализации в случае технического проектирования, а также на значение полиоптимализации, иллюстрируя это примерами для разных видов оптимализации. Показан графический метод полиптимализации в случае, когда одна из двух переменных решающих является дискретной.

Итоги работы это (на ряду с пкт. 1.4) часть 7-ая. В ней даются примеры практического использования предлагаемой модели процесса выбора. Показаны главные особенности этой модели, указаны подлинные его элементы. Предложен также объём будущих теоретических работ над методикой выбора.

Предлагаемая в настоящей работе модель процесса выбора может быть использована для описания этого – же процесса (нпр. для целей компьютерной поддержки в учебном процессе проектирования для создания детальных алгоритмов или эвристических программ вспоиагающих выбор и решение. Может быть основой для создания новых частных методов, может быть также исходной базой для дальнейших теоретических исследований.

Приведённый в работе материал это введение в теорию выбора, в частности выбора в техническом проектировании.

MODEL AND METHODS OF THE CHOICE PROCESS IN ENGINEERING DESIGN

Summary

The present book deals with a choice in the design process; in any phase of the process: from the conceptual to the final one. The choice may concern to the whole being designed object, or its part,or it may concern designing team, or a process procedure, as well. In the known literature one can not find any methodological generalizations about the choice process: there is no theory, there are no adequate methods. The target of the present work is to submit a general model of the choice process, the model that is valid for such case where a primary information is given as the triple: $< A, \Omega, \phi >$, where A is a set of variants, Ω is a set of requirements, and ϕ is a set of objectives and preferences (the value system). The above information may be uncomplete and/or fuzzy (of a descriptive character). In the course of the choice process this primary information is to be transformed to the mathematical model of optimization, i.e. requirements, as well as the optimization function must be defined, and the necessary mathematical relations must be found, in terms of adequate variables.

Within the introductory part of the work, the goal is formulated, the survey of the literature, as well as the characteristics of the work itself and obtained results are discussed. A glossary of terms and symbols is given.

In Chapter 2 the design process is explored: it is shown as an element of a system of fulfilling human needs, and hence the value system in designing is derived. The systematics of choice tasks is given. Then the structure of the design process is analysed, and three complementary models of the structure are proposed. On this background the decision situations are identified.

In Chapter 3 the choice task is defined and a structure model of the choice process is given, what is a substantial part of this work. The implications on a value system resulted from the fact that the design process is split into the phases, and the design object is decomposed into parts, are discussed. Then the literature discussing different approaches to the choice task is reviewed. The variables and a systematics of choice tasks are discussed. Two complementary alternative models of the choice tasks are given.

The problems of a mathematical model of the object being designed are discussed in Chapter 4.The cases when the relations are to be of a random or a fuzzy character are detailed.

The important part of the work is Chapter 5, where methods of formalization and scalarization of the value system are given. The various proposals are submitted, that describe a probabilistic, as well as a fuzzy character of the value system. A few mathematical models of the scalar overall optimization criterion are given, of different properties.

In Chapter 6 some pecularities of optimization in designing are discussed. An attention on a polyoptimization is drawn, on some examples. A method is given, when one criterion of two is of a discrete character.

In concluding Chapter 7, an application of the proposed methodology is discussed, as well as its characteristics and its original elements. The future research works are suggested.

The model that is proposed in the present work may be applied for the formalization of the choice process (for the CAD purposes, for example), for the teaching of designing, for the algorithmization or devising heuristic programmes for aiding the choice process, also it may be a foundation for new methods and for research efforts.

The content presented in this paper may be taken as an introduction to the choice theory, especially in engineering design.

P.3341/84/72

Cena zł 97,-

WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:

44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-096 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZRoWiD-u 2
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN — Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9