

# AKADEMIA OBRONY NARODOWEJ

CENTRUM INFORMATYKI

## SYMULACYJNE MODELE POTENCJAŁU OBRONNEGO PAŃSTWA I POTENCJAŁU BOJOWEGO SIŁ ZBROJNYCH

Projekt badawczy typu „grant” nr OT00A 055 18

ANALIZA  
SYSTEMÓW I PROGRAMÓW KOMPUTEROWYCH  
POD WZGLĘDEM ICH PRZYDATNOŚCI W PRACACH  
DOTYCZĄCYCH OCEN POTENCJAŁOWYCH

Zadanie badawcze II

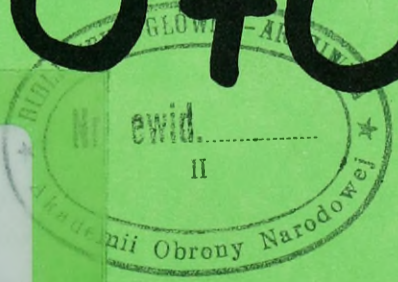
61070

Biblioteka Główna  
Akademii Obrony Narodowej

05-004670



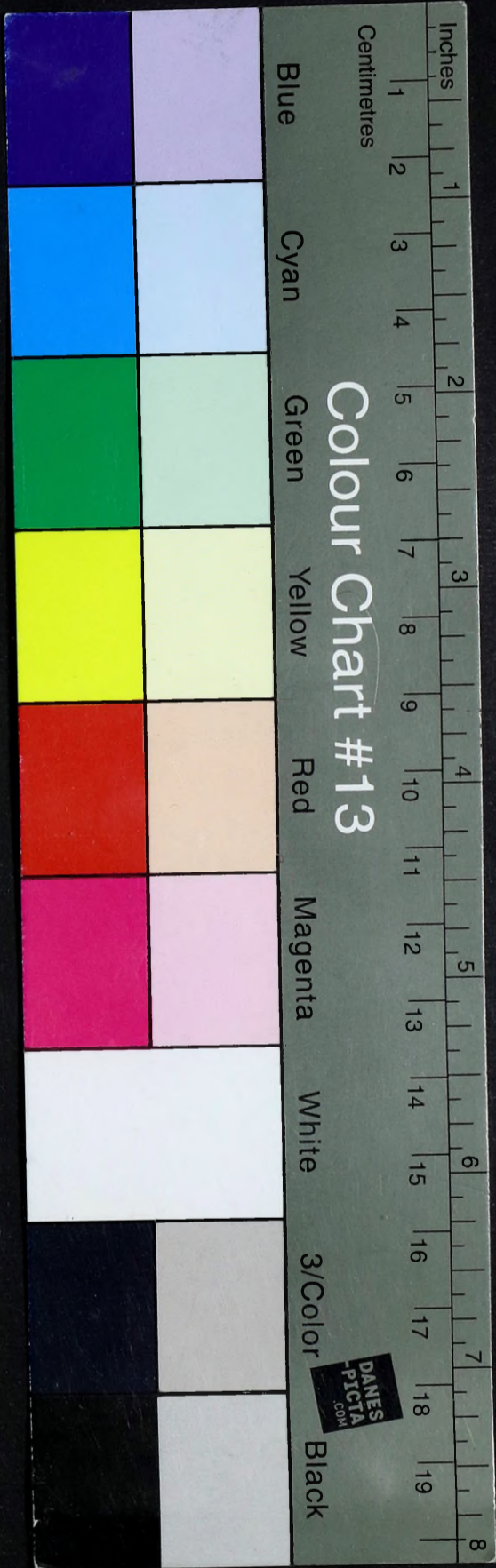
05-004670-001-0



PNB

WARSZAWA

2000



**AKADEMIA OBRONY NARODOWEJ**

---

**CENTRUM INFORMATYKI**



**SYMULACYJNE MODELE  
POTENCJAŁU OBRONNEGO PAŃSTWA I PO-  
TENCJAŁU BOJOWEGO SIŁ ZBROJNYCH**

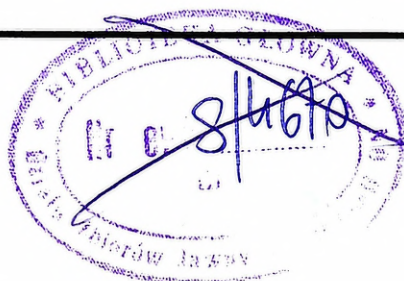
Projekt badawczy typu „grant” nr OT00A 055 18

**ANALIZA SYSTEMÓW I PROGRAMÓW KOMPUTEROWYCH  
POD WZGLĘDEM ICH PRZYDATNOŚCI  
W PRACACH DOTYCZĄCYCH OCEN POTENCJAŁOWYCH**

Zadanie badawcze II

---

Warszawa



2000

## ZESPÓŁ AUTORSKI

Kierownik pracy: **Plk prof. dr hab. inż. Czesław FLANEK**

Autorzy:

**Kmdr dr hab. Inż. Krzysztof FICOŃ**

**Plk dr inż. Maciej RATAJCZAK**

**Plk dr inż. Ryszard WIELEBA**

**Plk dr inż. Zbigniew KLIMKIEWICZ**

**Plk mgr inż. Hieronim KORNACKI**

**Pplk dr inż. Janusz WOCIAL**

**Mjr dr Henryk SPUSTEK**

**Mjr dr Grzegorz KOTT**

Przedstawione opracowanie jest wynikiem realizacji projektu badawczego nr OT00A 055 18 pt. **SYMULACYJNE MODELE POTENCJAŁU OBRONNEGO PAŃSTWA I POTENCJAŁU BOJOWEGO SIŁ ZBROJNYCH**. Temat opracowany został zgodnie z „Harmonogramem wykonania projektu badawczego.

Opracowanie stanowi realizację zadania badawczego nr II projektu.

Przedstawiane opracowanie zawiera syntezę problemów dotyczących systemów i programów, które autorzy poddali analizie w aspekcie ich przydatności w podjętej dziedzinie badawczej. Wnioski dotyczą ustalenia stanu faktycznego, tj. funkcjonujących lub projektowanych aplikacji *software*'owych w różnych klasach modeli w problemie ocen potencjałowych dowolnego przedmiotu.

Opracowanie jest zbiorem autorskich artykułów poświęconych różnorodnym klasom modeli. Analizie poddano modele kalkulacyjne, optymalizacyjne, statystyczne (w tym ekonometryczne), symulacyjne i eksperckie. W każdym artykule przedstawiono istotę modelu danej klasy oraz przykłady znanych modeli (w szczególności w zastosowaniach ocenowych potencjału obronnego państwa i potencjału bojowego sił zbrojnych). We wnioskach ustosunkowano się co do rokowań badawczych danej klasy modelu oraz przedstawiono perspektywy zastosowań. W efekcie opracowany materiał jest podstawowym w dziedzinie narzędzi *software*'owych właściwych w pracach ocenowych potencjału. Stanowi podstawę do konceptualizacji ogólnych modeli kompleksowych i szczegółowych w postaci modeli symulacyjnych.

## SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI.....	4
WPROWADZENIE.....	5
1. ISTOTA KOMPUTEROWYCH MODELI OCENOWYCH POTENCJAŁU .....	7
2. MODELE KALKULACYJNE .....	14
3. MODELE OPTYMALIZACYJNE.....	28
4. MODELE TAKSONOMICZNE .....	56
5. MODELE SYMULACYJNE.....	75
6. MODELE EKSPERTOWE .....	96
ZAKOŃCZENIE .....	114

## WPROWADZENIE

Przedstawione opracowanie zawiera przegląd funkcjonujących i projektowanych narzędzi *software*'owych w zastosowaniach ocenowych potencjału obronnego państwa i potencjału bojowego sił zbrojnych. Analizę dostępnych narzędzi *software*'owych przeprowadzono przyjmując za kryterium klasę modelu przyjętą w implementacji programowej.

W dotychczasowych wojskowych badaniach naukowych problemy modelowania potencjału obronnego państwa i bojowego sił zbrojnych podejmowane były kilkakrotnie. Znanych jest powszechnie kilka znaczących w tej dziedzinie modeli (metod). Szczególnie dotyczących potencjału bojowego sił zbrojnych. Prac dotyczących modelowania potencjału obronnego państwa jest znacznie mniej. Z rzadka jednak konceptualizowany model przyjmuje postać aplikacji *software*'owych. Jeszcze rzadziej aplikacja taka staje się narzędziem do oceny (badania: projektowania, planowania, itp.) potencjału (obronnego państwa, bojowego sił zbrojnych). Taki stan rzeczy powinien się zmienić.

Opracowanie zawiera wprowadzenie, sześć rozdziałów merytorycznych oraz zakończenie. (Bibliografia podana została na zakończenie każdego rozdziału merytorycznego.)

Rozdział pierwszy dotyczy systemów i programów komputerowych, których główną funkcją jest ocena określonego przedmiotu. Tak więc wymaganiem podstawowym aplikacji jest realizacja odpowiedniego modelu ocenowego określonego oryginału (przedmiotu) zastosowanego przez badacza do opisu przedmiotu badanego – potencjału obronnego państwa i potencjału bojowego sił zbrojnych.

Rozdział drugi dotyczy **modeli kalkulacyjnych** opisu potencjału obronnego państwa. Przedstawione zostały różnorodne określenia (ujęcia) ogólnoteoretyczne – brak jest bowiem w nauce ustalonych poglądów w tej materii. Po analizie problemu zaproponowana została definicja. Następnie przedstawione zostało kwantytatywne ujęcie problemu wraz z przykładami realizacji. Wyniki badań empirycznych zaprezentowano w formie graficznej.

Rozdział trzeci dotyczy **modeli optymalizacyjnych**. Podane zostały zagadnienia optymalizacji liniowej, transportowej oraz optymalizacji dyskretnej. Przedstawione zostały modele matematyczne i podstawowe kategorie zastosowania.

Rozdział czwarty dotyczy **modeli taksonomicznych**. Tu także przedstawione zostały ogólnoteoretyczne ujęcia analizowanego modelu. W szczególności w analizie podano kategorie cech diagnostycznych badanego obiektu. Podana została także procedura badania taksonomicznego.

Rozdział piąty dotyczy **modeli symulacyjnych**. Przedstawione zostały podstawowe pojęcia: symulacji, i modelu symulacyjnego. W szczególności uwagę skupiono na istocie modelowania symulacyjnego, przedstawiając także ogólne wskazówki budowania modeli tej klasy. Ponadto zaprezentowano ogólne wnioski natury metodologicznej oraz przykład modelu symulacyjnego: Model-5.

Rozdział szósty dotyczy **modeli ekspertowych**. Przedstawiona została istota modelu ekspertowego. Pokazano architekturę systemu PC-Shell oraz strukturę bazy wiedzy systemu ekspertowego. Każdy moduł został omówiony z punktu widzenia funkcjonalnego. Pokazane zostały obszary zastosowań tej klasy systemów.

W zakończeniu opracowania przedstawiono syntezę podjętych w rozdziałach 2 - 6 problemów podjętych różnorodnych klas modeli. Syntezy dokonano w aspekcie metodologicznym i merytorycznym.

Praca jest syntezą dotychczasowego stanu wiedzy naukowej w dziedzinie narzędzi *software*'owych stosowanych do oceny potencjału obronnego państwa i potencjału bojowego sił zbrojnych.

Praca stanowi podstawę dalszych badań w dziedzinie niezbędnych współczesnemu badaczowi środków i narzędzi programowych do oceny potencjału obronnego państwa i bojowego sił zbrojnych. Przedstawione wnioski i dokonane konkluzje upoważniają do tego, aby dalsza eksploracja badawcza przeprowadzana była w klasie modeli symulacyjnych. Ta klasa, ze względu na cel badawczy najlepiej rokuje.

## 1. Istota modelu ocenowego

Do badania różnych przedmiotów (obiektów i zjawisk) najkorzystniejszym jest *podejście systemowe*, pozwalające na rozpatrywanie wszystkich aspektów problemu jako całości.

Wyróżnikami *podejścia systemowego* są następujące cechy działania poznawczego i pragmatycznego (praktycznego)<sup>1</sup>:

- traktowanie badanego przedmiotu jako systemu,
- traktowanie danego przedmiotu jako systemu złożonego z wzajemnie powiązanych podsystemów,
- traktowanie przedmiotu jako systemu należącego do większego systemu,
- świadome posługiwanie się **modelem systemu** o określonym poziomie rozdzielności, wyróżniającym określony aspekt działania przedmiotu.

Przyjmijmy zatem następującą definicję systemu: "**Systemem nazywa się każdy złożony obiekt wyróżniony z badanej rzeczywistości, stanowiący całość tworzoną przez zbiór obiektów elementarnych (elementów) i powiązań (relacji) pomiędzy nimi**".<sup>2</sup>

System jest więc określoną całością - ma swój **skład** (kompozycję) czyli zbiór tworzących go elementów oraz **strukturę** czyli zbiór istotnych relacji między tymi elementami.

Jeśli relacje zachodzące pomiędzy elementami systemu pociągają tworzenie nowej własności systemu, to jest to cecha systemowa. **Cechą systemową** zatem nazywamy taką własność, która charakteryzuje system jako całość, lecz której nie mają elementy systemu.

Stosowanie w procesie badawczym podejścia systemowego (wprowadzanie pojęcia systemu dla badanego przedmiotu, dekompozycja na podsystemy, itp.) wymaga przestrzegania następujących reguł posługiwania się pojęciem systemu:

- **ściśłość** - ściśle określić, elementy należące do systemu i elementy jego otoczenia,
- **niezmiennność** - określony systemu jest niezmienny podczas badań,

---

<sup>1</sup> P.Sienkiewicz, "Inżynieria systemów kierowania", PWE 1988, s.57

- **zupelność** - podział systemu powinien być zupełny,
- **rozłączność** - podział systemu powinien być rozłączny,

W procesie badawczym realizowany jest proces modelowania. **Modelowanie jest odwzorowaniem w określonym języku badanego przedmiotu (oryginału).**

Między systemem pojęciowym przyjętym jako model danego systemu rzeczywistego, a oryginałem (tj. systemem rzeczywistym) musi zachodzić co najmniej relacja **homomorfizmu**, wyrażającym większe lub mniejsze podobieństwo (strukturalne, funkcjonalne) modelu do oryginału.

Tak więc, **model to umowny (abstrakcyjny) obraz przedmiotu rzeczywistego.** Model może w wielu szczegółach różnić się od tego oryginału, ale powinien zachować z nim pewne wspólne cechy, podobieństwo i analogię, głównie w odniesieniu do charakterystyk podlegających badaniu zgodnie z założonymi celami.

Klasyfikację modeli systemów można przeprowadzić ze względu na różne kryteria. Najczęściej występujące to:

- **przeznaczenia** (badawcze, pragmatyczne, modele jako wzory);
- **przydatności** (zjawiskowe, OCENOWE, decyzyjne);
- **odwzorowania zmian i procesów** (statyczne, dynamiczne);
- **stosowanego stopnia abstrakcji** (opisowe, fizyczne, analogowe, formalne);
- **określoności zmiennych modelu** (deterministyczne, probabilistyczne, strategiczne, rozmyte<sup>3</sup>);
- **odwzorowania struktury systemu** (strukturalne, funkcjonalne, rozwojowe);
- **sposób przedstawienia modelu** (opisowe, ikonograficzne, wykreślne, analityczne, fizyczne);
- **technikę postępowania z modelem (eksperymentowania)** (analityczne (normatywne), symulacyjne).

Przy czym najważniejszymi kryteriami klasyfikacji modeli są następujące<sup>4</sup>:

1. Ze względu na **cel poznawczy (rezultat modelowania)** wyróżnia się modele:

---

<sup>2</sup> P.Sienkiewicz, "Teoria efektywności systemów kierowania" T.1 – Wstęp do systemologii. Rozprawa habilitacyjna, ASG, 1979, s.82

<sup>3</sup> Klasyfikacja podana przez A. Chojnackiego, "Modelowanie matematyczne", W-wa 1986, s.30-31

<sup>4</sup> P.Sienkiewicz „Inżynieria systemów kierowania”, PWE 1988, s.91

- **desygnujące** (zjawiskowe, wyjaśniające), których celem jest uzyskanie pożądanego wyjaśnienia istoty cech (zjawisk) systemu;
- **ocenowe**, których celem jest uzyskanie OCEN, czyli wypowiedzi wyrażających aprobatę lub dezaprobatę dla stanu (przeszłego, bieżącego, przyszłego) systemu;
- **decyzyjne**, których celem jest uzyskanie określonych decyzji, niezbędnych do zapewnienia stanu pożądanego ze względu na przyjęte kryterium.

2. Ze względu na **formę przedstawienia modelu** (język modelowania) wyróżnia się modele:

- **opisowe** wyrażone w języku naturalnym.
- **formalne (symboliczne)** wyrażone w języku logiki (głównie logiki matematycznej);
- **matematyczne** wyrażone w języku matematyki. W modelach matematycznych zależności i powiązania przedstawiane są przy pomocy równań i układów równań algebraicznych różniczkowych oraz nierówności, itp.

3. Ze względu przyjmowany **aspekt badawczy** wyróżnia się modele:

- **morfologii** (struktury, budowy) systemu;
- **funkcjonowania** (zachowania się, działania) systemu;
- **rozwoju** (ewolucji, przemian) systemu.

Wyróżnione aspekty wyrażają także postępujący stopień poznania systemów: (1) wiąże się z poznaniem budowy systemu (jego elementów i powiązań między nimi), (2) – z poznaniem praw rozwoju systemu, czyli z określeniem kierunków przemian jego struktur, funkcji, procesów, itp.

W klasie modeli matematycznych klasyfikację modeli systemów można rozszerzyć, jeżeli rozpatrzemy np. charakter stosowanych kategorii matematycznych, to wtedy możemy mówić o modelach :

- **ciągłych i dyskretnych;**
- **liniowych i nieliniowych;**
- **statycznych i dynamicznych;**
- **deterministycznych i probabilistycznych;**

Zauważmy jeszcze, że, jeżeli uzyskany model dotyczy tylko **wybranego aspektu badań**, to można mówić o **modelu cząstkowym (jednoaspektowym)**, jeśli zaś wszystkie, to o **modelu kompleksowym (wieloaspektowym)**.

Jak powiedziano celem **modelu ocenowego** jest uzyskanie ocen analizowanego systemu rzeczywistego. Ocenę formułuje się wówczas, gdy stwierdza się pewną zgodność (albo niezgodność) danego stanu rzeczy z określonym kryterium. Ocena jest obiektywna wtedy, kiedy oparta jest na kryterium (kryteriach) wyrażającym wartości odpowiadające potrzebom obiektywnym, tj. niezależnym od podmiotu oceniającego.

Najogólniej można wyróżnić oceny:

1. zwykłe, które dotyczą wewnętrznych własności systemu; orzekające, że system jest po prostu dobry lub zły bezwzględnie;
2. użyteczne, które dotyczą zewnętrznych wartości systemu; orzekające, że system jest dobry lub zły do czegoś, z uwagi na coś itp.

Ze względu na uwarunkowania czasowe wyróżnia się oceny:

1. **retrospektywne** (*ex post*), czyli oceny formułowane dla przeszłych (w stosunku do chwili, w której dokonywana jest ocena) stanów systemu;
2. **prospektywne** (*ex ante*), czyli oceny formułowane dla przyszłych stanów systemu.

Ze względu na licznosc zbioru kryteriów oceny efektywności wyróżnia się oceny:

1. **jednokryterialne**, czyli formułowane na podstawie jednego i tylko jednego kryterium;
2. **wielokryterialne**, formułowane na podstawie co najmniej dwóch różnych kryteriów.

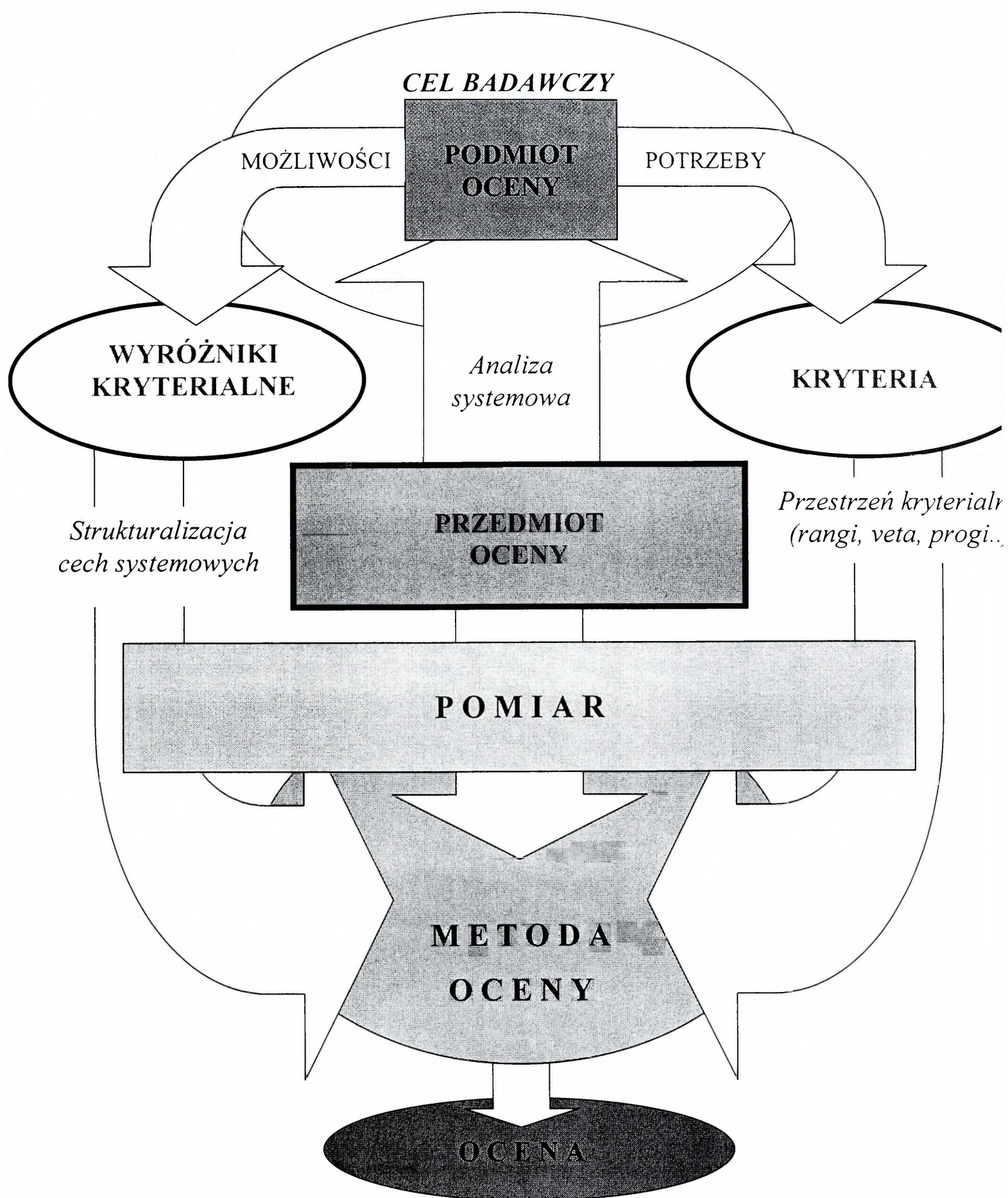
Do najważniejszych czynności realizowanych w procesie oceniania systemów należą:

- wybór istotnych cech systemu oraz skali wartości wspólnej dla wszystkich cech;
- wybór kryterium (kryteriów) oceny systemu;
- ustalenie rodzaju oceny systemu;

- ustalenie metody oceny systemu;
- określenie sposobu zastosowania oceny w procesie racjonalizacji funkcjonowania lub projektowania systemu.

Na rys. 1-1 pokazano koncepcję modelu ocenowego.

Model ocenowy konceptualizuje i realizuje określony podmiot z punktu widzenia celu badawczego. Wychodząc z tych przesłanek określa potrzeby jaki otoczenie wymaga od przedmiotu ocenianego, a także możliwości jakie tkwią w przedmiocie w aspekcie potrzeb. Potrzeby powinny określić funkcje kryterialne (m.in. rangi w przypadku wielu kryteriów oraz ewentualnie progi i veta, a więc zakres akceptowalnych wartości dla każdego kryterium). Natomiast z możliwości przedmiotu, poprzez strukturalizację jego cech systemowych określić należy tzw. wyróżniki kryterialne. Podstawowym etapem jest opracowanie odpowiedniej metody oceny, metodologicznie poprawnej. Z punktu widzenia przyjętej metody należy dokonać pomiaru przedmiotu. W tym celu dla każdego elementu zbioru wyróżników kryterialnych określić należy sposób pomiaru (miernik, skalę pomiarową, zakres, itp.). Mogą to być badania eksperckie, pomiar bezpośredni, inne miary ocenowe, itp. Po opracowaniu danych właściwych dla badanego przedmiotu, stosując przyjętą metodę oceny w aspekcie określonej przestrzeni kryterialnej, opracowywana jest ocena badanego przedmiotu.



Rys. 1-1. Koncepcja modelu ocenowego

ŹRÓDŁO: J. Wocial

## Bibliografia do rozdziału 1

1. Gutenbaum J. – *Modelowanie matematyczne systemów*, PWN, Warszawa – Łódź 1987.
2. Sienkiewicz P. – *Teoria efektywności systemów kierowania*, rozprawa habilitacyjna, ASG 1979.
3. Sienkiewicz P. – *Inżynieria systemów. Wybrane zastosowania wojskowe*, MON, Warszawa 1983.
4. Sienkiewicz P. – *Inżynieria systemów kierowania*. PWE, Warszawa 1988.
5. Sienkiewicz P. – *Analiza systemowa. Podstawy i zastosowania*, Bellona, Warszawa 1994.
6. Sienkiewicz P. – *Teoria efektywności systemów*, Ossolineum, Wrocław 1987.
7. Steczkowski J., Zeliaś A. – *Statystyczne metody analizy cech jakościowych*, PWE, Warszawa 1981.
8. Wocial J. – *Metoda oceny wartości modeli systemu sił zbrojnych* – rozprawa doktorska, AON, Warszawa 1998.
9. Zeigler B. P. – *Teoria modelowania i symulacji*, PWN, Warszawa 1984.

## 2. MODELE KALKULACYJNE

### 2.1. Istota modelu

Oszacowanie wielkości potencjału obronnego państwa następuje z wieloma trudnościami, wynika to z samej definicji potencjału, jak i z tego, że obiekt mierzony charakteryzuje się różnorodnymi wielkościami. Dobór wielkości (w sensie cech), ich ranga, normalizacja nie pozostają bez wpływu na wielkość wynikową. W środowiskach zajmujących się problematyką pomiaru wszelkich kategorii potęgi, w tym także potencjału obronnego państwa opinie na temat zasadności pomiaru są kontrowersyjne. Realności zwracają uwagę na trudności pomiaru, ograniczone możliwości kwantyfikacji czynników zwłaszcza politycznych podstaw potęgi i przyjmują, że jedynym wiarygodnym testem jest test bitwy. Pomimo zauważalnego sceptycyzmu co do możliwości i sensowności uzyskania wiarygodnego szacunku, wydaje się, że pomiary przeprowadzone z dokładnością do rzędu wielkości lub przedziału wartości mogą już stanowić podstawę do prowadzenia analiz porównawczych wykorzystywanych w pracach planistycznych, podejmowaniu decyzji czy informowania. Oszacowanie (zmierzenie) wartości potencjału gospodarczego – obronnego wymaga odpowiednich narzędzi badawczych – modeli matematycznych. Przystępując do pomiaru należy być świadomym jakim celom ma służyć pomiar. W zależności od celu badań (jaki decydent, do podejmowania jakich decyzji będzie wyniki wykorzystywał) należy zwrócić uwagę na:

- \* Dopuszczalny błąd pomiaru,
- \* Metodę pomiaru,
- \* Sposób weryfikacji wyników,
- \* Sposób interpretacji wyników.

Szacunki wartości potencjału gospodarczo – obronnego przeprowadza się w celach:

**Poznawczo – porównawczych.** Uzyskane wyniki służą do oceny własnych możliwości oraz hipotetycznych sojuszników i przeciwników. Wyniki porównań własnych możliwości z możliwościami innych można wykorzystać w pracach dotyczących kształtowania podstaw systemu bezpieczeństwa zwłaszcza gdy jego koncepcja opiera się na równowadze potencjałów.

**Planistycznym.** Wyniki można traktować jako wskaźniki, kryteria decyzyjne dla organów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo narodowe.

Do pełnego opisu potencjału gospodarczo – obronnego konieczna jest jego parametryzacja. Zamiar ten może być zrealizowany poprzez scharakteryzowanie potencjału takimi wielkościami jak:

- masa – wielkość zasobu,
- gotowość – wielkość zasobu gotowego do użycia,
- mobilność – zdolność uzyskania gotowości.

W literaturze przedmiotu wyróżnia się dwa podejścia do szacowania wielkości potencjału gospodarczo – obronnego:

- syntetyczne, które w ujęciu „agregatowym” umożliwia przybliżony, ogólny pomiar (szacunek),
- analityczne – ilościowe określenie rozmiarów poszczególnych czynników potencjału.

Pierwsze z nich stosuje się do ocen przybliżonych ale całościowych, na przykład do porównania produktu narodowego brutto określonych państw. W badaniach szczegółowych, np. wielkości produkcji metali można posługiwać się miernikami analitycznymi.

## 2.2. Modele funkcjonujące

### **Model Knorra**

Zdaniem autora modelu<sup>1</sup> najdogodniejszym miernikiem syntetycznym potencjału gospodarczo-obronnego jest produkt krajowy brutto (PKB) i udział w nim wydatków militarnych. Możliwość pokrycia szeroko rozumianych wydatków militarnych określa wielkość nadwyżki PKB, która zostaje uzyskana w wyniku modyfikacji w rachunku dochodu narodowego i dokonania koniecznych zmian poszczególnych jego

---

<sup>1</sup> M. Sułek, Pomiar potencjału wojenno-ekonomicznego za pomocą mierników syntetycznych. Materiały i studia nr 11/1992. AON-Warszawa.

składników. Bazując na tej koncepcji, potencjał gospodarczo obronny szacowany jest w oparciu o poniższy zapis matematyczny.

$$P_{G-O} = PKB + A + K_C - I_b - Z_C + I$$

Uruchomienie dodatkowych mocy wytwórczych lub zwiększenie wydajności w wyniku uaktywnienia siły roboczej powiększa dodatkową produkcję o wielkość A.

Zmniejszona produkcja dóbr ze względu na zredukowaną konsumpcję ludności cywilnej oznacza zmniejszenie produkcji środków produkcji i konsumpcji dla sektora cywilnego ( $K_C$ ) co wynika z konieczności zmiany profilu produkcji w zakładach.

Redukcja krajowych inwestycji ( $I_b$ ) oznacza zablokowanie takich inwestycji, które nie są istotne dla powiększenia produkcji wojennej.

Zredukowanie wielkości cywilnych zakupów ( $Z_c$ ) umożliwia przeznaczenie tych funduszy na zakupy sektora militarnego.

Zmiany w wydajności pracy mogą powiększyć lub zmniejszyć wielkość nadwyżki PKB.

Zalety modelu Knorra wynikają z prostoty obliczeń oraz z jednakowego, pięniężnego miana wszystkich składników.

Do wad należy zaliczyć zastosowanie trudno mierzalnych składników oraz możliwość niedokładnego ich oszacowania i wymaga wiedzy ekspertów.

Zakładając, że dysponuje się danymi „a priori” można ten model wykorzystać do jako model akademicki dla potrzeb dydaktycznych czy też do badań symulacyjnych, choć do prognozowania jest mało przydatna.

### ***Model Stankiewicza***

Punktem wyjścia dla modelu<sup>2</sup> są tezy doktryny obronnej odnoszące się do takich pojęć jak „produkcja wojenna” i „czas mobilizacji gospodarczej”. Konsekwencją ma być zajęcie stanowiska w kwestiach wielkości i struktury produkcji mającej podstawowe znaczenie w przyszłej wojnie oraz czasu niezbędnego na zmobilizowanie gospodarki.

Przyjęcie założeń dotyczących produkcji akceptowalnej przez doktrynę obronną, w przedziale czasu potrzebnego na mobilizację i prowadzenie wojny pozwala wysnuć tezę, że potrzeby wojenne dają się odzwierciedlić w hipotetycznym dochodzie narodowym, który to może być oszacowany dla przyszłych okresów.

Autor modelu proponuje następujące zależności na określenie wartości potencjału:

$$P = D(T - t)$$

lub

$$P = WT - t)$$

Gdzie:

P – potencjał gospodarczo-obronny;

D – oszacowany „*ex ante*” dochód narodowy (o strukturze akceptowanej przez doktrynę obronną);

W – przewidywana wielkość produkcji wojennej w jednostce czasu;

T – czas prowadzenia wojny;

t – czas potrzebny na mobilizację gospodarki.

Model Stankiewicza ma niezaprzeczalne zalety dla dokonywania szacunków zgrubnych ze względu na czytelność mian składników oraz prostotę obliczeń. Problemy występują przy pomiarze składników wyrażen, które w zasadzie można jedynie szacować, a szacunki mogą być obarczone dużym błędem. Źródła danych – oceny ekspertów, są trudno dostępne. Metoda może być aplikowana i jako model służyć do badań symulacyjnych, lecz przy analizach porównawczych uzyskane wyniki mogą nie odzwierciedlać rzeczywistości.

### **Model Ciastonia**

S. Ciastoń w pracy „Elementy teorii ekonomiki obrony” z 1974 r. wylicza następujące kategorie czynników „potencjałotwórczych”:

#### 1. Czynniki społeczno polityczne:

---

<sup>2</sup> W. Stankiewicz, *Ekonomika obrony*. Warszawa 1970.

- ustrój, sojusze,
- systemy i metody zarządzania,
- świadomość polityczna i kulturalna,
- poziom wykształcenia,
- poziom zdrowia społeczeństwa.

## 2. Elementy społeczno-gospodarcze i geograficzne:

- siły wytwórcze,
- międzynarodowa współpraca gospodarcza,
- poziom organizacyjno-techniczny przemysłu,
- rozwój dróg i mostów,
- stan łączności,
- stan energetyki,
- zasoby i rezerwy materiałowe,
- poziom nauki,
- położenie geograficzne,
- zasoby naturalne.

## 3. Elementy militarne:

- sojusze wojskowe,
- liczebność i jakość sił zbrojnych,
- formalizacje zmilitaryzowane i obrony cywilnej,
- budownictwo obronne,
- środki indywidualnej ochrony.

Z przedstawionej grupy czynników nie wszystkie w prosty sposób są mierzalne, a zatem oszacowanie ich wartości może wymagać udziału ekspertów. Dobór cech również może budzić kontrowersje, stąd autor opis modelu podaje bardzo ogólnie jako „jakąś” zależność funkcyjną

$$PGO_m = 1/n f(L, P, W, R, S, \dots)$$

Gdzie:

PGO – potencjał gospodarczo-obronny,  
L – ludność,  
P – powierzchnia kraju,  
S – produkcja stali,  
R – produkcja ropy naftowej,  
n – współczynnik skali np. 1 – 10, 1 – 1000,  
m – rok, dla którego przeprowadzono obliczenia.

Zaletą modelu jest to, że wyspecyfikowana grupa składników w sposób mierzalny odzwierciedla potęgę państwa.

Wadą modelu jest to, że składniki wyrażone są różnymi mianami. Niektóre są trudne do oszacowania.

Przy tak dużym uogólnieniu opisu model nie nadaje się do implementacji.

### ***Model Farrara***

Autor modelu proponuje określenie wielkości potencjału gospodarczo obronnego w oparciu o prosty wzór.

$$P = IP * L$$

Gdzie:

P – wielkość potencjału;

IP – produkcja przemysłowa;

L – ludność.

W oparciu o powyższe można stwierdzić, że zaproponowana formuła, z uwagi na swą lapidarność, nie da się wykorzystać w efektywny sposób dla wiarygodnej parametryzacji potencjału.

## **Model R.S. Cline'a**

R.S. Cline<sup>3</sup> uznaje potencjał gospodarczo – obronny za jeden z filarów potęgi państwa. Pojęcie potęgi (*power*) syntetyzuje możliwości jednostki politycznej (państwa, sojuszu) na arenie międzynarodowej.

Model który zaproponował R.S. Cline składa się z dwóch charakterystycznych części takich jak;

- • części pierwszej (C+E+M), odpowiadającej w przybliżeniu pojęciu potencjału gospodarczo-obronnego państwa;
- części drugiej (S+W), wskazującej na możliwości jego uruchomienia, co w sumie daje ocenę roli, jaką państwo może odgrywać na arenie międzynarodowej, w tym również (a może nawet przede wszystkim) w czasie konfliktu zbrojnego.

Formułę Cline'a można zapisać jak niżej

$$Pp = (C + E + M) * (S + W)$$

gdzie:

Pp - *perceived power* (potencjał ogólny) państwa w stosunkach międzynarodowych;

C – *critical mass* (masa krytyczna) czyli ludność i terytorium łącznie danego państwa;

E – *economik capability* (możliwości gospodarki) potencjał gospodarczy;

M – *military capability* (możliwości militarne) potencjał militarny;

S – *strategic purpose* (strategia państwa);

W – wola urzeczywistnienia strategii państwa.

Terytorium mierzone jest w tysiącach mil kwadratowych, ludność w milionach. Możliwości gospodarki określane przez PKB liczony w miliardach dolarów, udział w handlu światowym oraz PKB na głowę mieszkańca. Wszystkie te wartości bezwzględ-

ne przeliczane są na punkty, przy czym przyjęto poziom maksymalny i minimalny punktów. Uzyskanie wyniku powyżej maksimum nie daje nic więcej, poniżej zaś minimum daje zero punktów. Punkty przyznawane są w zasadzie w zależności od tego, do jakiej grupy, obejmujące kraje o zbliżonych wartościach, należy dane państwo.

### **Model W. Fucksy**

Model pomiaru potęgi militarnej wg W. Fucksy<sup>4</sup> (1965rok), fizyka niemieckiego opiera się na koncepcji trzech tzw. czynników potęgotwórczych: ludności, produkcji stali i produkcji energii elektrycznej.

Ogólny wskaźnik potęgi ekonomiczno - obronnej (M) oblicza się wg poniższych wzorów:

$$Ms = L^a \cdot S^b,$$

przy czym  $Ms = L^{\frac{1}{3}} \cdot S$

$$Me = L^a \cdot E^b,$$

przy czym  $Me = L^{\frac{1}{3}} \cdot E$

$$M = \frac{Ms + Me}{2}$$

gdzie:

M - syntetyczny wskaźnik potencjału gospodarczo - obronnego.

Ms - wskaźnik cząstkowy oparty na liczbie ludności i produkcji stali,

Me - wskaźnik cząstkowy oparty na liczbie ludności i produkcji energii elektrycznej,

L - liczba ludności,

---

<sup>3</sup> W. Stankiewicz, *Ekonomika obrony*, Warszawa AON, 1994, s. 70.

<sup>4</sup> Tamże, s. 71.

S - produkcja stali,

E - produkcja energii elektrycznej,

a, b - współczynniki przyjmujące wartości 1/3; 1/2; 2/3; 1; 2.

Przeprowadzone obliczenia i ich weryfikacja na podstawie badań potencjału gospod. - obronnego wybranych państw wykazały, że najlepiej jest stosować współczynniki  $a=1/3$ ;  $b=1$ .

Do tej prostej konstrukcji Fuks doszedł wykorzystując własności krzywej logistycznej oraz metodę prób i błędów.

Po krytyce, która odnosiła się głównie do potęgotwórczego charakteru stali, Fuks zmodyfikował w 1978 r. dowartościowując w nim rolę energii elektrycznej, pozostawiając jednocześnie sporo swobody dla potencjalnych użytkowników jego modelu. Zaleca on po prostu liczenie cząstkowego wskaźnika  $Me$  podwojonego lub potrojonego. Ogólny zapis przyjmie wtedy postać:

$$P = \frac{1}{a + b} \left[ a \left( L^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{E}{n} \right) + b \left( L^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{S}{n} \right) \right]$$

gdzie założono:

a, b - wielokrotności wskaźników cząstkowych np.  $a = 3$ ,  $b = 1$ ,

n - wskaźnik znormalizowany,  $n = 1$ .

### **Model Kulczyckiego**

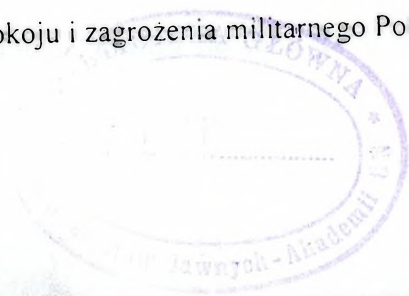
R. Kulczycki<sup>5</sup> potencjał militarny, wojenny przedstawił wg poniższej formuły jako:

$$PW = W * ( U * PR ) \text{ gdzie,}$$

PW - potencjał militarny, wojenny;

---

<sup>5</sup> R. Kulczycki, *Metodyka prognozowania (diagnozowania) stanu pokoju i zagrożenia militarnego Polski* AON, Warszawa 1993, s. 32.



PR - wskaźnik wykorzystania potencjału rażenia na określonym kierunku zagrożenia ;

W - uogólniony wskaźnik wykorzystania potencjału rażenia obliczony wg poniższej formuły:

$$W = W^L * W^Z * W^K * W^W$$

Gdzie:

$W^L$  - współczynnik wpływu czynnika ludzkiego na efektywność wykorzystania potencjału rażenia;

$W^Z$  - współczynnik wpływu zasilania na efektywność wykorzystania potencjału rażenia;

$W^W$  - współczynnik wpływu kierowania na efektywność wykorzystania potencjału rażenia;

$W^K$  - współczynnik wpływu kierowania na efektywność wykorzystania potencjału rażenia.

Dalszy rozwój teorii potencjału poszedł w kierunku precyzowania wzajemnych powiązań między jego elementami i poszerzania zestawu wskaźników charakteryzujących potencjał z różnych stron.

### **Model Sułka**

M. Sułek przyjął założenie, że ogromne potrzeby materialne systemu obronnego państwa, w tym głównie sił zbrojnych mogą być zaspokojone przez odpowiednio do tego przygotowaną gospodarkę. Ze względu na dużą liczbę dziedzin mających szczególne znaczenie dla obronności (bezpieczeństwa) państwa autor przyjął, że główną miarą potencjału obronnego jest odpowiednio skorygowany produkt krajowy brutto. W modelu rolę czynnika korygującego pełni stopa wydatków militarnych. Ponadto za czynniki kreatywne potencjału autor przyjmuje ludność i powierzchnię kraju. Zasoby ludzkie są źródłem składnika osobowego sił zbrojnych, a także siły roboczej. Powierzchnia państwa jest postrzegana nie tylko jako teren ale również jako obszar (prze-strzeń), na którym mogą być prowadzone działania wojenne. Z uwagi na fakt, że czas i

przestrzeń mają szczególne znaczenie dla szeroko rozumianego zaplecza gospodarczego sił zbrojnych czynnik czasu ujęty jest w modelu w produkcie krajowym brutto ( ma wymiar dochodu w jednostce czasu). Rozumowanie stanowi logicznie spójną całość. Ujmuje bowiem ludzi (pracowników i żołnierzy), narzędzia pracy i walki, oraz przestrzeń i czas, a więc wszystkie istotne dla pokojowej produkcji i walki czynniki. Model przedstawia się następująco.

$$P = f(w, l, p)$$

gdzie:

P. – wartość potencjału

w = m\*D – wielkość wydatków militarnych,

m. – stopa wydatków,

D – produkt krajowy brutto,

L – liczba ludności,

P. – powierzchnia kraju.

Dla potrzeb badawczych autor proponuje model w zależności funkcyjnej

$$P. = w^\alpha * l^\beta * p^\gamma$$

Gdzie  $\alpha, \beta, \gamma$  - stałe ( autor proponuje wartości:  $\alpha = 1.5, \beta = 0.5, \gamma = 0.25$ ).

Wartość potencjału oszacowana na podstawie rzeczywistej wartości stopy wydatków stopy wydatków stanowi tylko część potencjalnych (globalnych) możliwości państwa - potencjał wykorzystania (Pw). Przyjmując do obliczeń maksymalną (np. m. = 1 – maksymalny koszt jaki może ponieść społeczeństwo) wartość wydatków można oszacować potencjał globalny (Pg). Różnica między wartością globalną a wykorzystaną potencjału stanowi rezerwę potencjału (Pr).

$$Pg = Pw + Pr$$

Porównanie wskaźników wykorzystania, globalnych i rezerw oraz relacji między nimi daje możliwość wnikliwszej analizy i charakteru potencjału.

Po przekształceniu zależności  $P = w^{\alpha} * l^{\beta} * p^{\gamma}$  można wyznaczyć wskaźniki – składowe – udział poszczególnych czynników w wielkości szacowanej. Będą to następujące wskaźniki:

- $U_w$  – udział wydatków militarnych we wskaźniku  $P_w$ ,
- $U_{lw}$  – udział ludności we wskaźniku  $P_w$ ,
- $U_{pw}$  - udział powierzchni we wskaźniku  $P_w$ ,
- $U_d$  – udział PKB we wskaźniku  $P_g$ ,
- $U_{lg}$  – udział ludności we wskaźniku  $P_g$ ,
- $U_{pg}$  – udział powierzchni we wskaźniku  $P_g$ .

Wskaźniki gotowości potencjału autor określa następującymi zależnościami:

$$q_p = \frac{P_w}{P_g}$$

$$q_w = \frac{w}{P_g}$$

$$q = \frac{\sqrt{P_w}}{P_g}$$

Wskaźnik mobilności (elastyczności) potencjału:

$$f_l = \frac{P_w}{l}$$

$$f_p = \frac{P_w}{p}$$

$$f = \frac{P_w}{\sqrt{l * p}}$$

Zaletą modelu M. Sułka jest to, że wszystkie składniki są łatwo mierzalne; jest prosty do obliczeń.

Do wad należy zaliczyć fakt, że dla państw o małym dochodzie narodowym niektóre wskaźniki mogą przyjmować wartości ujemne co budzić może pewne wątpliwości natury interpretacyjnej.

Model jest przydatny do analiz porównawczych; wyniki mogą służyć do wypracowania pochodnych wskaźników ocenowych.

### ***Model bilansowy***

Metoda bilansowa jest jednym z bardziej rozpowszechnionych mierników analitycznych potencjału obronnego. Umożliwia ona porównanie potrzeb i możliwości ich zaspokojenia w przewidywanym okresie. Podstawę każdego bilansu stanowi równość sum stron przychodowych i rozchodowych. Główne pozycje aktywów i pasywów mogą być następujące:

#### Aktywa (strona przychodowa):

- stan zapasów,
- dostawy z produkcji bieżącej,
- dostawy od sojuszników i krajów neutralnych.

#### Pasywa:

- przewidywane zużycie w okresie mobilizacji i wojny,
- do produkcji cywilnej,
- do produkcji wojennej,
- eksport do sojuszników, krajów neutralnych, potencjalnego przeciwnika.

Analizę nakładów i wyników przeprowadza się tzw. metodą przepływów międzygałęziowych. Schemat takiego bilansu odzwierciedla gałęzie sektora militarnego i cywilnego gospodarki narodowej oraz macierz współczynników technicznych produkcji.

Do zalet modelu należy możliwość wyznaczenia potencjalnych rezerw w gałęziach. Zasadniczą wadą modelu jest iż w wyniku nie otrzymuje się jednego wskaźnika potencjału; trudno określić macierz współczynników technicznych produkcji; mogą wystąpić duże różnice w przewidywaniach i kalkulowanych potrzebach (sektora militarnego) i możliwości ich zaspokojenia

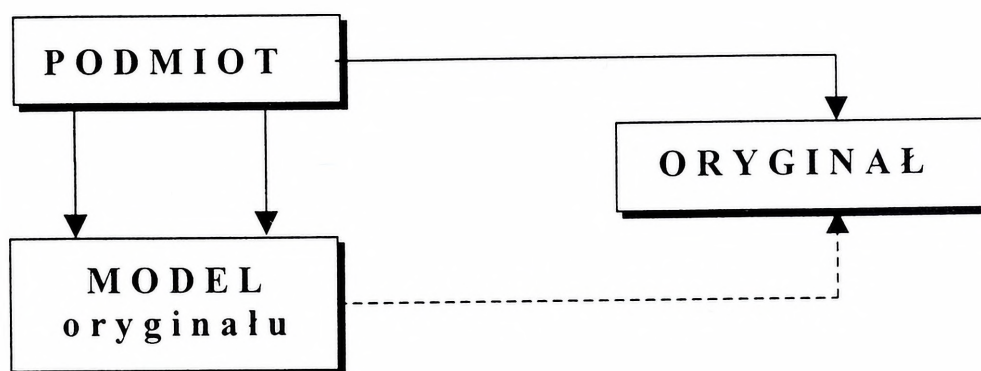
## Bibliografia do rozdziału 2

1. Bączkowski Z. – *Porównanie potencjału obronno – gospodarczego wybranych państw kontynentu – praca studyjna*. Zaoczne Podyplomowe Studium Informatyki, Zarządzania i Analizy Systemowej AON, Warszawa 1997.
2. Ciastoń S – *Ekonomiczne aspekty obronności*, MON, Warszawa 1972.
3. Flanek Cz., Kinasiewicz M., Urbanek M. – *Model potencjału obronno – gospodarczego i militarne*, praca n-b „Potencjał”, Centrum Informatyki AON 1997.
4. Flanek Cz., Kinasiewicz M., Urbanek M. – *Model potencjału obronno – gospodarczego i militarne*, praca n-b „Potencjał”, Centrum Informatyki AON 1998.
5. Karnia D – *Zastosowanie wielowymiarowej analizy porównawczej do modelowania potencjału obronno – gospodarczego państwa – praca studyjna*. Zaoczne Podyplomowe Studium Informatyki, Zarządzania i Analizy Systemowej AON, Warszawa 1997.
6. Kulczycki R. – *Obliczanie potencjałów wojskowych*, Myśl Wojskowa nr 7, 1989.
7. Kulczycki R. – *Metodyka diagnozowania i prognozowania stanu zagrożenia i pokoju*, praca n-b „Opcja”, AON 1996.
8. Rogucki A. – *Analiza systemów w planowaniu obrony. Aspekty ekonomiczne – polityczne*. Biblioteka Wiedzy Wojskowej, MON, Warszawa 1975.
9. Sienkiewicz P. – *Inżynieria systemów. Wybrane zastosowania wojskowe*, MON, Warszawa 1983.
10. Sienkiewicz P. – *Analiza systemowa. Podstawy i zastosowania*, Bellona, Warszawa 1994.
11. Sobolewski A. – *Model systemu cybernetyczno – ekonomicznego porównania potencjałów obronno – gospodarczych*, Wydział Nauk Ekonomicznych WAP, Warszawa 1985.
12. Sułek M. – *Pomiar potencjału wojenno – ekonomicznego za pomocą mierników syntetycznych*. Materiały i studia nr 11/1992, AON, Warszawa.
13. Sułek M. – *Potencjał gospodarczo – obronny. Pojęcie. Pomiar. Decyzje*, Instytut Ekonomiki Obrony AON, Warszawa 1993.
14. Wocial J. – *Metoda oceny wartości modeli systemu sił zbrojnych – rozprawa doktorska*, AON, Warszawa 1998.
15. Wocial J. – *Oszacowanie i ocena potencjału rażenia państw sił zbrojnych Polski i państw otoczenia w 1999 roku*, rękopis 1999.
16. Zagórski J. – *Teoretyczny model potencjału wojennego*. Wojskowy Przegląd Ekonomiczny, nr 3/1969.

### 3. MODELE OPTYMALIZACYJNE

Model to hipotetyczna konstrukcja myślowa obejmująca układ przyjętych założeń, aby uchwycić najistotniejsze cechy i zależności występujące w badanym procesie.

Koncepcję modelu jako wzorca przedstawia rys.3-1.



Rys. 3-1. Pojęcie modelu (wzorca)

Każdy model powinien być opracowywany na podstawie dwóch zasad:

**Zasada 1:**

Modelem M oryginału O ze względu na obserwatora P jest obiekt M, gdy odzwierciedla istotne relacje tego oryginału.

**Zasada 2:**

Obserwator P akceptuje M jako model oryginału, gdy M upraszczając opis oryginału O powoduje:

- przyrost wiedzy o oryginale O za pomocą modelu M, tj. dostarcza dodatkowej informacji o oryginale O, która pozwala:
  - sterować obiektem;
  - uczyć sterowania obiektem.

Modele decyzyjne można podzielić na następujące klasy:

- modele konceptualne;
- modele formalne (matematyczne);
- modele optymalizacyjne;

- modele komputerowe;
- modele symulacyjne.

**Model konceptualny** to wynik wiedzy i doświadczenia konstruktora modelu służący poznaniu najistotniejszych cech badanego zjawiska i jego związków z otoczeniem. Modele służą celom poznawczym, polegającym na opisie i ułatwieniu zrozumienia zasad zachowania się zastępowalnych przez nie systemów. Ponadto są środkiem opisu zachowania się określonych systemów.

**Model formalny** (matematyczny) jest to wzorzec pozwalający zidentyfikować zdarzenia i procesy oraz całokształt ich powiązań i współzależności o charakterze strukturalnym i funkcjonalnym, przedstawiających zachowania rozpatrywanych ogniw i ich charakterystykę.

Wzorzec ten opisany przy użyciu określonego języka formalnego przyjmuje postać modelu formalnego.

Jedną z jego postaci są **modele matematyczne**, w których strukturę badanego procesu tworzą związki między wyróżniającymi właściwościami, opisywanymi za pomocą zmiennych decyzyjnych i parametrów modelu.

Głównym celem **modelu matematycznego** jest odwzorowanie istoty badanego procesu za pomocą funkcji matematycznych.

Za pomocą reguł matematycznych model matematyczny sprowadza opis działania procesu (systemu) do opisu jego cech, przede wszystkim mierzalnych.

Szczególnie ważne dla procesu podejmowania decyzji jest więc dokonanie na takim modelu operacji pozwalających uzyskać najbardziej pożądane zachowanie się systemu. Dzięki temu można usprawnić działanie analizowanego systemu.

**Modele matematyczne** mogą być formułowane w postaci modeli algebry liniowej, modeli statystycznych, modeli optymalizacyjnych i modeli sieciowych.

Wybór języka modelowania zależy od przeznaczenia modelu.

Wyboru jednej ze wspomnianych klas modeli dokonujemy w procesie kwantyfikacji celu, zmiennych decyzyjnych i ich charakteru oraz zależności między nimi.

Jeżeli model matematyczny jest przedstawiony w postaci układów równań lub nierówności, przy czym zmienne tego układu wyrażają poszukiwane poziomy realizacji poszczególnych działalności, a ich wartości są w określony sposób ograniczone, a ponadto, integralną częścią modelu jest pewien miernik realizacji celu (funkcja kryt

erium) pozwalający na ocenę jakości rozwiązań układu równań (nierówności), to mamy do czynienia z **optymalizacyjnym modelem decyzyjnym**.

Wyróżniamy modele z miernikiem jednego celu (jedną funkcją kryterium) nazywane modelami jednokryterialnymi i modele z miernikiem wielu celów (wieloma funkcjami kryterium) nazywane modelami wielokryterialnymi.

**Model komputerowy** jest to taki model formalny, w którym poszczególnym jego stanom przypisujemy odpowiednie charakterystyki liczbowe – parametry.

Zachowanie się modelu i jego elementów możemy opisać za pomocą procedur numerycznych przy wykorzystaniu techniki komputerowej.

Model komputerowy opisany jest w języku programowania zorientowanym na przedmiot analizy i na wykorzystaną technikę komputerową.

### 3.1. ISTOTA MODELU OPTYMALIZACYJNEGO

Z problemami decyzyjnymi związane jest ściśle pojęcie optymalizacji.

**Optymalizacją** nazywać będziemy działalność, której celem jest uzyskanie najlepszego rezultatu w danych warunkach i przy określonym kryterium oceny.

Najlepszy z otrzymanych wyników nazywamy **optymalnym**.

Rozważania dotyczące optymalizacji będziemy łączyć tylko z matematycznymi modelami decyzyjnymi, a metody optymalizacji traktować jako metody stricte matematyczne.

Oczywiście w kategoriach optymalizacji można traktować każdą działalność, której celem jest znalezienie najlepszych sposobów i środków działania, jednak tylko w ramach przyjętego modelu matematycznego możemy orzec obiektywnie, czyli optymalnym.

Wobec powyższego:

*Zadanie optymalizacji – to określone zadanie matematyczne, metoda optymalizacji – to określona metoda matematyczna, a rozwiązanie (decyzja) optymalne – to rozwiązanie za pomocą danej metody określonego zadania optymalizacji.*

Rozwiązanie optymalne nie jest „w ogóle” rozwiązaniem problemu decyzyjnego, lecz najlepszym w sensie przyjętego kryterium i określonych ograniczeń przyjętych w matematycznym modelu decyzyjnym.

W problemie decyzyjnym będącym zadaniem optymalizacyjnym kryterium podejmowania decyzji przedstawione jest w postaci funkcji na ogół wielu zmiennych, tzw. zmiennych decyzyjnych.

Decyzja polega więc na wyborze pewnych wartości zmiennych, przy czym obszar możliwych wyborów nie jest dowolny, lecz na ogół dokładnie określony przez podanie układu nierówności (lub równań) – tzw. ograniczeń wiążących zmienne decyzyjne. Spośród dopuszczalnych, tzn. należących do określonego wyżej układu, czyli zbioru rozwiązań dopuszczalnych, należy dokonać wyboru takich wartości, dla których funkcja kryterium przyjmie wartość maksymalną (lub minimalną).

***Zatem optymalizacją nazywać będziemy maksymalizację lub minimalizację funkcji kryterium przy zadanych ograniczeniach.***

Zadanie optymalizacji polega więc na podaniu pewnego zbioru  $X_0 \subset X$  pewnej funkcji  $F$  określonej na tym zbiorze i przyjmującej wartości ze zbioru  $R$  liczb rzeczywistych oraz poszukiwaniu takiego  $x^0 \in X_0$ , że:

$$\bigwedge_{x \in X_0} F(x^0) \geq F(x)$$

lub

$$\bigwedge_{x \in X_0} F(x^0) \leq F(x)$$

Pierwszy warunek odpowiada zadaniom maksymalizacji funkcji  $F$ , a drugi – minimalizacji tej funkcji, przy czym należy pamiętać, że

$$[\max F(x) = - \min [-F(x)]]$$

Klasyczne zadanie optymalizacji można sformułować w sposób następujący:

Niech dane będą funkcje:

$$F : R^n \longrightarrow R^1;$$

oraz

$$G_i : R^n \longrightarrow R^1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m$$

Oznacza to, że każdemu elementowi  $x \in X \subset R^n$  został jednoznacznie przyporządkowany pewien element  $y \in Y \subset R^1$ , to na zbiorze  $X$  została określona funkcja  $F$  przyjmująca wartości  $y = F(x)$  w zbiorze  $Y$  (analogicznie dla funkcji  $G(x) = y, i = 1, 2, 3, \dots, m$ ).

Zadanie optymalizacji polega na znalezieniu wektora  $x_0$  należącego do zbioru

$$x_0 = \left\{ x : G_i(x) \begin{cases} \geq \\ = \\ \leq \end{cases} 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \right\}$$

takiego, że dla każdego  $x \in X_0$  spełniony jest warunek

$$F(x^0) \leq F(x)$$

co jest równoważne poszukiwaniu

$$\min_{x \in X_0} F(x)$$

Zadania optymalizacji można klasyfikować ze względu na różne kryteria, np. ze względu na charakter rozwiązań dopuszczalnych  $X_0$  i relacji porządkującej określonej na tym zbiorze.

Jeżeli zbiór ma przeliczalną lub skończoną liczbę elementów, to mamy do czynienia z zadaniem dyskretnym, w przeciwnym wypadku – z zadaniem ciągłym.

**Tabela 1. Klasyfikacja zadań optymalizacyjnych**

Kryterium klasyfikacji	Rodzaj zadania
1	2
Postać funkcji kryterialnej i ograniczeń	Liniowe Nieliniowe (wypukłe, kwadratowe)
Postać zmiennych decyzyjnych	Ciągłe Dyskretne (całoczbowe i binarne)
Charakter parametrów	Deterministyczne Probabilistyczne
Liczba stopni (etapów) procesów decyzyjnych	Statyczne Dynamiczne (ciągłe, dyskretne)
Liczba funkcji kryterium	Jednokryterialne Wielokryterialne
Typ pojęć opisujących zadanie	Ostre Nieostre (rozmyte)

Zauważmy, że na ogół można założyć, że zbiór rozwiązań dopuszczalnych jest pewnym podzbiorem liniowej przestrzeni topologicznej<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Zbiór  $X$  nazywa się przestrzenią topologiczną, jeżeli została wyróżniona pewna rodzina jego podzbiorów, zwanych zbiorami otwartymi, spełniająca następujące warunki:

Relacje porządkowania na zbiorze rozwiązań dopuszczalnych mogą być deterministyczne i probabilistyczne.

Jeżeli porządek ten ustalają:

- pewna funkcja rzeczywista określona na tym zbiorze oraz relacje typu  $>$ ,  $=$ ,  $<$ ,

to dane jest zadanie jednokryterialne, natomiast jeżeli porządek ten określają pewien operator działający w przestrzeni  $R^n$  oraz relacja przynależności do stożka dodatniego w tej przestrzeni, to dane jest zadanie wielokryterialne.

Ponadto wyróżnia się zadanie bez ograniczeń (optymalizacji bezwarunkowej) i z ograniczeniami (optymalizacji warunkowej).

Jeżeli element rozwiązań dopuszczalnych należą do przestrzeni skończonej wymiarowej  $R^n$ , to mamy do czynienia z zadaniem optymalizacji statycznej, natomiast gdy rozwiązania dopuszczalne są elementami przestrzeni nieskończonej wymiarowej, to – optymalizacji dynamicznej.

Najczęściej spotykany podział zadań optymalizacyjnych opiera się na własnościach funkcji  $F$  i  $G$ , i tak – jeżeli funkcja  $F$  oraz wszystkie funkcje  $G_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  są funkcjami liniowymi, to wtedy dane jest zadanie optymalizacji liniowej, natomiast gdy chociaż jedna z tych funkcji jest funkcją nieliniową (wklęsłą lub wypukłą), to dane jest zadanie optymalizacji nieliniowej.

### 3.2. OPTYMALIZACJA LINIOWA

Zadanie decyzyjne, w którym wszystkie relacje są liniowe oraz wszystkie zmienne są ciągłe nazywamy zadaniem programowania liniowego.

Ogólna postać zadania programowania liniowego (optymalizacji liniowej) jest następująca:

- 
- zbiór pusty i cała przestrzeń są zbiorami otwartymi;
  - część wspólna zbiorów otwartych jest otwartym;
  - suma dowolnej mnogości zbiorów otwartych jest zbiorem otwartym

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max(\min) \quad \textcircled{1}$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, m \quad \textcircled{2}$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad \text{dla } i = m+1, \dots, p \quad \textcircled{3}$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad \text{dla } i = p+1, \dots, r \quad \textcircled{4}$$

$$x_j \geq 0 \quad \textcircled{5}$$

Każdy wektor zmiennych decyzyjnych

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Spełniający warunki ograniczające  $\textcircled{2} \div \textcircled{5}$  nazywamy rozwiązaniem dopuszczalnym zadania programowania liniowego.

Rozwiązanie dopuszczalne, dla którego funkcja celu  $\textcircled{1}$  osiąga maksimum (minimum) nazywamy rozwiązaniem optymalnym.

Parametrami w tym zadaniu są  $c_j$ ,  $b_i$  oraz  $a_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, r$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Parametr  $c_j$  nazywamy  $j$ -tą wagą funkcji celu, parametr  $b_i$  -  $i$ -tym wyrazem wolnym, a parametr  $a_{ij}$  - współczynnikiem macierzy ograniczeń stojącym w  $i$ -tym wierszu i  $j$ -tej kolumnie.

Zadanie programowania liniowego posiada dwie szczególne postacie:

- postać standardową;
- postać kanoniczną.

Zadaniem programowania liniowego o postaci kanonicznej nazywamy zadanie, w którym wszystkie warunki ograniczające są równaniami oraz na wszystkie zmienne nałożone są warunki dotyczące ich nieujemności.

Zadanie programowania liniowego w zapisie macierzowym można przedstawić w sposób następujący:

$$cx \rightarrow \max(\min)$$

$$Ax = b$$

$$x \geq 0$$

gdzie:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad - \text{ macierz współczynników}$$

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_m \end{bmatrix} \quad - \text{ wektor wyrazów wolnych}$$

$$c = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_n] \quad - \text{ wektor wag funkcji celu}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} \quad - \text{ wektor zmiennych decyzyjnych}$$

Zadaniem programowania liniowego o postaci standardowej nazywamy zadanie, w którym wszystkie ograniczenia są nierównościami typu  $\leq$  dla zadań na maksimum, bądź nierównościami typu  $\geq$  dla zadań na minimum oraz wszystkie zmienne muszą być nieujemne.

Zadanie programowania liniowego w postaci standardowej ma postać:

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{dla } j = 1, 2, \dots, n$$

lub

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \min$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{dla } j = 1, 2, \dots, n$$

Podstawowym zabiegiem stosowanym przy rozwiązywaniu zadań decyzyjnych jest sprowadzanie ich do równoważnej, lecz wygodniejszej ze względów numerycznych postaci.

W zależności od sytuacji i potrzeb będziemy rozpatrywać zadania typu minimum lub typu maksimum pamiętając, że przejście od jednego typu do drugiego dokonuje się za pomocą zależności

$$\min F(x) = - \max (- F(x))$$

Typowymi zadaniami praktycznymi formułowanymi w kategoriach optymalizacji są:

- zadania wyboru asortymentu produkcji polegające na takim zaplanowaniu asortymentu produkcji w oparciu o posiadane surowce oraz przy efektywnym wykorzystaniu parku maszynowego, aby zysk ze sprzedaży wytworzonych produktów był maksymalny;
- zadania transportowe (z kryterium czasu lub kryterium kosztów) polegające na takim dostarczeniu środków materiałowych z magazynów do odbiorców, aby czas (koszt) dowozu tych środków był minimalny;
- zadania przydziału, polegające na takim przydziale zadań wykonawcom, aby ogólny efekt realizacji wszystkich zadań był maksymalny;
- zadania minimalizacji pustych przebiegów środków transportowych;

- zadania przydziału środków komunikacyjnych polegające na takim wyborze wariantu planu przydziału, aby zapewnić przewiezienie określonej ilości środków materiałowych przy minimalnych kosztach;
- zadanie wyboru systemu uzbrojenia, czyli określenie takiej ilości zestawów uzbrojenia poszczególnych typów, aby uzyskać maksymalną efektywność całego systemu uzbrojenia;
- zadanie rozmieszczenia uzbrojenia i osprzętu samolotu, aby uzyskać maksymalną efektywność bojową samolotu przy danych ograniczeniach;
- zadanie znalezienia najkrótszej drogi w sieci komunikacyjnej.

Szczególnym przypadkiem optymalizacji liniowej jest binarne zadanie optymalizacji liniowej, zwane także programowaniem liniowym zero – jedynkowym. W zadaniach tych zmienna decyzyjne przyjmuje tylko dwie wartości: 1 lub 0.

Zadanie programowania binarnego, liniowego zaliczamy do klasy zadań stanowiących zadanie optymalizacji dyskretnej.

### 3.2. ZAGADNIENIA TRANSPORTOWE

Jednym z najbardziej interesujących szczególnych przypadków liniowych zadań decyzyjnych jest zadanie transportowe.

Zadanie transportowe spośród wszystkich liniowych zadań decyzyjnych wyróżnia przede wszystkim postać macierzy współczynników układu warunków ograniczających.

Niech będzie danych  $n$  dostawców i każdy z nich niech dysponuje odpowiednio  $a_i$  jednostkami towaru ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Każdy z  $m$  odbiorców będzie wymagał dostaw w wysokości  $b_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) jednostek.

Każdy z dostawców może zaopatrywać dowolnego odbiorcę (odbiorców) i na odwrót, odbiorca może otrzymać towar od dowolnego dostawcy (dostawców).

Przyjmujemy, że są również dane jednostkowe koszty transportu  $c_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ;

$j = 1, 2, \dots, m$ ) od  $i$ -tego dostawcy do  $j$  - tego odbiorcy.

Będziemy ponadto zakładać, że suma dostaw od poszczególnych dostawców do  $j$ - tego odbiorcy równa się jego zapotrzebowaniu, a suma dostaw wysłanych od  $i$ -tego dostawcy do wszystkich odbiorców nie przekracza ilości, jaką dostawca dysponuje.

Założmy przy tym, że całkowity koszt transportu jest sumą kosztów transportu na poszczególnych trasach (od  $i$ -tego dostawcy do  $j$ - tego odbiorcy) i na każdej z tras koszt ten jest wprost proporcjonalny do wielkości dostaw realizowanych na danej trasie.

Jeżeli wielkość  $r_{ij}$  oznaczymy wielkość dostaw od  $i$ -tego dostawcy do  $j$ - tego odbiorcy, to zagadnienie transportowe można zapisać w następującej postaci:

Wyznaczyć  $x_{ij}$  spełniające warunki:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad \textcircled{1}$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq a_i \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1 \quad \textcircled{2}$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad \textcircled{3}$$

dla których funkcja:

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad \textcircled{4}$$

osiąga wartość minimalną.

Zadanie sformułowane w punktach  $\textcircled{1}$  -  $\textcircled{4}$  nazywać będziemy klasycznym zadaniem transportowym.

Łatwo zauważyć, że zadanie to ma rozwiązanie jeżeli spełniony jest następujący warunek

$$\sum_{i=1}^n a_i \geq \sum_{j=1}^m b_j \quad \textcircled{5}$$

Warunek ten może być spełniony z równością bądź nierównością (ostrą).

Oba te przypadki odgrywają rolę kryterium klasyfikacji zadań, a mianowicie:

- jeżeli  $\textcircled{5}$  spełniony jest z równością, wówczas zadanie transportowe  $\textcircled{1}$  ÷  $\textcircled{4}$  nazywać będziemy zamkniętym zadaniem transportowym;

- jeżeli warunek ⑤ spełniony jest z nierównością (ostrą) zadanie ① ÷ ④ nazywać będziemy otwartym zadaniem transportowym.

### 3.2.1. Minimalizacja pustych przebiegów

Przy organizowaniu pracy środków transportowych problemem, który się pojawia stosunkowo często, są puste przebiegi.

Środki transportowe, krążąc między dostawcami a odbiorcami, są przydatne, jeżeli na danym odcinku trasy przewożą towary.

Sytuacja taka zachodzi, gdy odbiorca w dowolnym momencie okresu realizacji zadań przewozowych jest jednocześnie dostawcą.

Jednakże nie zawsze się to zdarza i środek transportu musi jechać od odbiorcy, do którego towar ostatnio dostarczył, do dostawcy znajdującego się w innym geograficznie punkcie. Oczywiście drogę tę pokona bez ładunku. Taki przejazd będziemy nazywać pustym przebiegiem.

Jest rzeczą oczywistą, że im częstsze i dłuższe są puste przebiegi, tym koszty funkcjonowania transportu wyższe, a tym samym wprowadzenie takich planów i programów wykorzystania środków transportu – mniej uzasadnione.

Założenia pustych przebiegów można rozpatrywać przy różnych założeniach.

Rozpatrzmy jego uproszczoną wersję, którą sprowadzić można do klasycznego zadania transportowego.

Przyjmijmy  $n$  miast, między którymi odległości wynoszą  $d_{ij}$  tworzy układ zamknięty, tzn. wymiana towarów odbywa się tylko między nimi i każde z miast może być zarówno dostawcą, jak i odbiorcą. Wielkość przesyłek między miastami określona jest liczbą całkowitą samochodów niezbędnych do ich realizowania i przyjmujemy, że wynosi ona  $[a_{ij}]$ .

Można więc wyliczyć dla każdego miasta liczbę samochodów niezbędnych do wywiezienia przesyłek.

Wynosi ona:

$$w_i = \sum_{j \neq i} a_{ij}$$

Podobnie dla każdego miasta można określić liczbę samochodów niezbędnych do przywiezienia towarów:

$$p_j = \sum_{j>} a_{ij}$$

Można zauważyć, że jeżeli  $w_i > p_i$ , to do miasta należy dostarczyć

$$r_i = w_i - p_i$$

pustych samochodów, które rozwiożą towar do odbiorców.

Samochody te powinny pochodzić z miast, dla których  $w_i < p_i$ . Miasta, dla których

$w_i = p_i$ , nie są ani dostawcami, ani odbiorcami pustych samochodów.

Wobec powyższego, z punktu widzenia zapotrzebowania na puste samochody zbiór miast można podzielić na trzy podzbiory:

- podzbiór dostawców ( $w_i < p_i$ );
- podzbiór odbiorców ( $w_i > p_i$ );
- podzbiór miast, które nie są ani dostawcami ani odbiorcami.

Znając wielkość dostaw pustych samochodów:

$$q_i = p_i - w_i \quad \text{dla } i, \text{ dla których } w_i > p_i$$

wielkość zapotrzebowania na puste samochody:

$$r_j = w_j - p_j \quad \text{dla } j, \text{ dla których } w_j > p_j$$

oraz odległości między nimi  $[d_{ij}]$ , można ułożyć zamknięte zadanie transportowe, którego rozwiązanie optymalne wskaże, z jakiego miasta i dokąd należy wysłać określoną liczbę pustych samochodów, aby tzw. *puste przebiegi* były minimalne.

Zagadnienia tego typu należą do klasy tzw. *zagadnień marszrutyzacji*.

### 3.2.2. Zadanie transportowe z kryterium czasu

Wyobraźmy sobie obecnie, że zależy nam na przewiezieniu pewnego towaru, który znajduje się u  $n$  dostawców w ilości  $a_i$  i który zamówiony jest przez  $m$  odbiorców w ilości  $b_j$ .

Czas (odległość) przewozu od  $i$ -tego dostawcy do  $j$ -tego odbiorcy dany jest w postaci tablicy czasów przejazdu  $T = [t_{ij}]$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ).

Należy znaleźć taki plan przewozów, aby cały zamówiony towar znalazł się jak najszybciej u odbiorców.

Dla tego typu zadań funkcję celu można zapisać w postaci:

$$\max_{(i,j) : x_{ij} > 0} \{t_{ij}\} \rightarrow \min$$

### 3.3. OPTIMALIZACJA DYSKRETNA

Istnieje wiele sytuacji decydujących, których nie możemy opisać używając tylko zmiennych ciągłych.

Zagadnienie decyzyjne, w którym chociaż jedna zmienna decyzyjna przyjmuje wartości dyskretne nazywamy *dyskretnym zagadnieniem decyzyjnym*.

Model matematyczny opisujący tę sytuację nazywamy *dyskretnym zadaniem decyzyjnym*.

Wśród zagadnień, w których relacje zachodzące między poszczególnymi wielkościami są liniowe, możemy wyróżnić trzy grupy zadań:

- zadania programowania całkowitoliczbowego, liniowego – gdzie wszystkie zmienne są liczbami całkowitymi;
- zadania programowania binarnego, liniowego – gdzie wszystkie zmienne są liczbami binarnymi;
- zadania programowania mieszanego, liniowego, gdzie część zmiennych to zmienne ciągłe, część – zmienne całkowite, a część – zmienne binarne.

Od strony formalnej zbiór rozwiązań dopuszczalnych zadania programowania dyskretnego, liniowego jest zbiorem niespójnym.

Nieciągłość zmiennych powoduje, że zadania te rozwiązuje się trudniej niż zadania programowania liniowego.

Można zaproponować dwa sposoby rozwiązywania zagadnień dyskretnych:

1. Formułujemy model matematyczny w postaci zadania programowania dyskretnego, liniowego, które rozwiązujemy jedną z metod ogólnych.
2. Zagadnienie o szczególnej strukturze rozwiązujemy bezpośrednio za pomocą odpowiedniego algorytmu.

Pierwszy sposób trudno stosować, gdy model matematyczny w postaci zadania programowania dyskretnego, liniowego prowadzi do zadania o dużych rozmiarach (duża – bardzo duża) liczba zmiennych i ograniczeń (warunków), a taka sytuacja występuje często przy optymalizacji dyskretnej.

Uniwersalną metodą rozwiązywania zagadnień dyskretnych jest metoda podziału i ograniczeń.

Do podstawowych zagadnień dyskretnych możemy zaliczyć:

- zagadnienie przydziału;

- lokalizację produkcji;
- wyboru projektu inwestycyjnego;
- ustalanie harmonogramu realizacji prac.

### 3.3.1. Zagadnienie optymalnego przydziału

Mamy  $n$  stanowisk i  $n$  pracowników. Znana jest macierz wydajności

$$w = [ w_{ij} ]$$

gdzie:

$w_{ij}$  - wydajność  $j$ -tego pracownika na  $i$ -tym stanowisku

Należy ustalić taki przydział pracowników do stanowisk pracy, aby łączna wydajność całego zespołu była maksymalna.

#### Model matematyczny

Wprowadzamy następujące zmienne decyzyjne:

$$x_{ij} \begin{cases} 1 - \text{jeżeli } j\text{-ty pracownik został przydzielony do } i\text{-tego stanowiska} \\ 0 - \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases}$$

Problem optymalnego przydziału możemy sformułować w postaci następującego liniowego zadania decyzyjnego, znajdź takie wartości zmiennych  $x_{ij}$ , aby

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \rightarrow \max \quad \textcircled{1}$$

przy warunkach

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad \textcircled{2}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad \textcircled{3}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & i = 1, 2, \dots, n; \\ 0 & j = 1, 2, \dots, n; \end{cases} \quad \textcircled{4}$$

Powyższe zadanie ① ÷ ④ jest zadaniem programowania binarnego, liniowego.

Funkcja celu postuluje maksymalizację łącznej wydajności całego zespołu.

Warunek ② zapewnia, że każde stanowisko zostanie obsadzone przez jednego pracownika.

Warunek ③ wymusza, aby każdy pracownik został przydzielony do jednego tylko stanowiska.

### 3.3.2. Zarządzanie zapasami

Pod pojęciem zapasów rozumiemy dobra znajdujące się w dyspozycji przedsiębiorstwa, przeznaczone (lecz czasowo nie włączone) do działalności produkcyjnej. Konieczność posiadania przez przedsiębiorstwo tego rodzaju zasobów wynika z dysproporcji między cyklami dostaw środków niezbędnych do produkcji a cyklem zużycia. Określone zapasy tworzy się więc głównie w celu uniknięcia strat z tytułu zakłóceń w ciągłości procesu produkcji: straty te w znacznej mierze przewyższają koszty utrzymania i organizacji zapasów.

Modele, które przedstawimy w dalszej części rozdziału, mają zazwyczaj na celu minimalizację kosztów własnych sterowania zapasami. Niezbędne więc jest rozpatrywanie różnego rodzaju kosztów. Można wśród nich wyróżnić:

- jednostkowy koszt magazynowania, który będzie liczony dla każdego materiału i odnoszony do jednostki czasu,
- koszt realizacji dostawy, który odpowiada wydatkom administracyjnym na operacje uzupełnienia zapasu, niezależnym od wartości produktu i wielkości zamówienia,
- jednostkowy koszt tworzenia zapasów, który będzie liczony dla każdego materiału i odnoszony do jednostki czasu.

W metodach optymalizacyjnych przy określaniu funkcji celu wykorzystywane są łączne koszty tworzenia, utrzymania i wyczerpania się zapasów. Istotne jest tu wyznaczenie optymalnej wielkości zakupów, przy której łączne koszty (wymienione wyżej) będą minimalne.

Znając optymalną wielkość partii dostawy, można ustalić inne wielkości, takie jak: optymalna liczba zakupów w ciągu roku oraz długość optymalnego cyklu zakupów.

### 3.3.2.1. Wybór optymalnej wielkości zakupu

Rozważmy model wyznaczania optymalnej wielkości zakupu. Przyjmijmy, że horyzont planu jest nieograniczony, co powoduje, że liczba decyzji o zakupie materiałów nie jest skończona. Załóżmy także, że wielkość zużycia materiałów jest znana i stała oraz wynosi  $D$ . W modelu tym poziom zapasów jest zmienną ciągłą, podobnie jak czas. Kolejnym warunkiem ograniczającym jest założenie, iż dostawa jest realizowana bezpośrednio po złożeniu zamówienia. Przyjmijmy także, że koszty dostawy  $c(x)$ , obejmujące koszty zamówienia, transportu, ubezpieczenia itp., składają się ze stałych kosztów zakupu  $P > 0$  i jednostkowych kosztów zakupu  $c > 0$  pomnożonych przez wielkość dostawy  $x$ .

$$c(x) = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ P + cx & x > 0 \end{cases} \quad \textcircled{1}$$

Dalej będziemy zakładać, że koszty magazynowania materiałów są opisane za pomocą funkcji liniowej.

Oznaczmy:

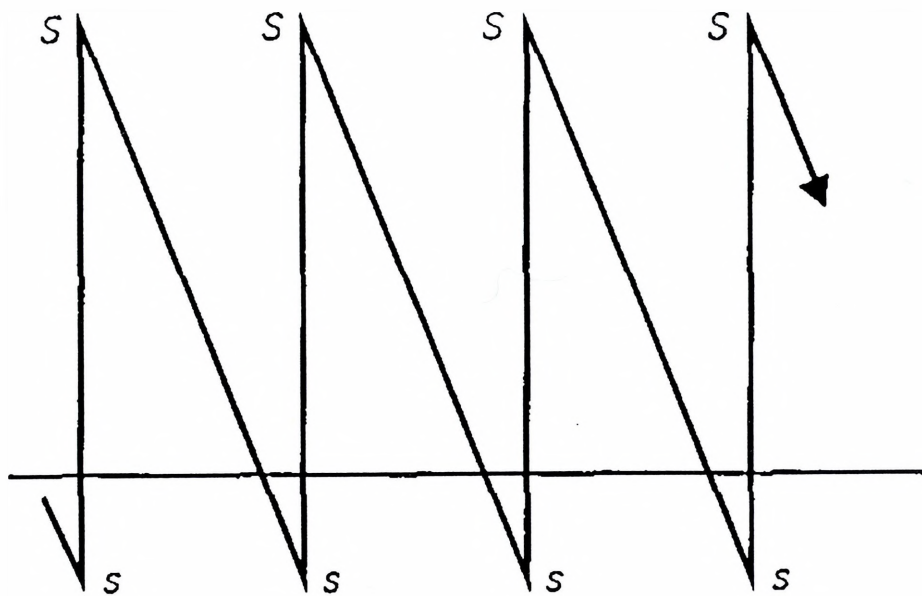
$h$  - koszt magazynowania jednostki zapasu w jednostce czasu, tj.  $h \geq 0$ ,

$z$  - wielkość zapasu,

$S$  - poziom, do którego uzupełniane są zapasy,

$s$  - punkt uzupełnienia zapasów (poziom zapasu, przy którym składamy zamówienie),

$Q = S - s$  oznacza wielkość zamówienia (zakupu).



Rys. 3-2. Stan magazynu

Przy tych założeniach i oznaczeniach stan magazynu będzie się przedstawiał tak, jak na rys. 3-2.

Można ponadto zauważyć, iż założenia te powodują, że dodatnia wartość  $s$  nie jest optymalna, gdyż zawsze mamy co najmniej  $s$  jednostek zapasu, które są magazynowane i nie są wykorzystywane do produkcji. Jest ona optymalna wówczas, gdy okres dostawy wynosi zero. podobnie jest wtedy, kiedy znamy dokładnie termin dostawy, gdyż możemy wtedy złożyć zamówienie na moment  $L$ , wcześniej od momentu krytycznego.

Jako funkcję kryterium przyjmujemy funkcję minimalizującą koszty przypadające na jednostkę czasu. Koszty magazynowania i zakupu są wówczas równe:

$$\frac{PD}{Q} + cD + \frac{hS}{2Q} \quad (2)$$

Wynika to stąd, że przeciętny koszt zakupu na jednostkę czasu jest równy  $PD/Q$ , gdyż  $D/Q$  jest przeciętną liczbą zakupów w jednostce czasu, a zmienny koszt zakupu wynosi  $cD$ .

Jeżeli zapasy zmieniają się tak, jak na rys. 3-2, to są one dodatnie w części  $S/Q$  całego okresu. Natomiast przeciętny poziom zapasów wynosi  $S/2$ . Zatem  $S/Q * S/2$  jest przeciętnym poziomem zapasów w jednostce czasu, a pomnożone przez  $k$  daje nam koszt magazynowania.

Jeżeli założymy, że poziom zapasów  $s$  może być mniejszy od zera, to wówczas do powyższych kosztów musimy dodać przeciętne straty wynikające z braku możliwości kontynuowania produkcji. Otrzymamy wtedy łączny koszt w jednostce czasu. Ponoszo-

ne straty będą proporcjonalne nie tylko do wielkości deficytu materiału, ale i długości okresu, w którym ten brak występuje.

Na podstawie rys. 3-2 możemy stwierdzić, że brak występuje w części  $-S/Q$  całego okresu, a minimalny poziom wynosi  $s$ . Przeciętny poziom braku wynosi  $-s/2$ . Wówczas przeciętny poziom odłożonego braku wynosi  $s^2/2Q$ . Oznaczmy przez  $b$  koszty związane z brakiem materiału. Zastosujemy tożsamość,  $S - s = Q$ , w celu eliminacji  $s$ . Wówczas koszt związany z brakiem zapasu wyniesie:

$$\frac{bs^2}{2Q} = \frac{b(S - Q)^2}{2Q} = \frac{bs^2}{2Q} - bS + \frac{bQ}{2}$$

Łączne koszty zarządzania zapasami ( $K$ ) można wtedy przedstawić w następujący sposób:

$$K = \frac{PD}{Q} + cD + \frac{(h + b)S^2}{2Q} - bS + \frac{bQ}{2} \quad (3)$$

Obliczmy pochodną cząstkową kosztu  $K$  względem  $S$  i przyrównajmy ją do zera:

$$\frac{\partial K}{\partial S} = \frac{2(h + b)S}{2Q} - b = 0 \quad (4)$$

Stąd otrzymujemy:

$$S = \frac{bQ}{h + b}$$

Podobnie mamy:

$$\frac{\partial K}{\partial Q} = -\frac{PD}{Q^2} - \frac{(h + b)S^2}{2Q^2} + \frac{b}{2} = 0$$

Za  $S$  podstawmy uprzednio wyliczone wyrażenie:

$$-\frac{PD}{Q^2} - \frac{(h + b)Q^2 b^2}{2Q^2 (h + b)^2} + \frac{b}{2} = 0$$

Mamy zatem:

$$Q = \sqrt{2PD} \sqrt{(h+b)hb} \quad (5)$$

W ten sposób otrzymaliśmy wzór na optymalną wartość  $Q$ , czyli wzór na optymalną wielkość zamówienia. Obliczmy także optymalne wielkości dla  $S$  i  $s$ :

$$S = \frac{bQ}{h+b} = \sqrt{2PD} \sqrt{\frac{b^2(h+b)}{hb(h+b)^2}}$$

Stąd otrzymujemy:

$$S = \sqrt{\frac{2PD}{h}} \sqrt{\frac{b}{h+b}}$$

Dla  $s$  mamy:

$$s = \sqrt{\frac{2PD}{b} \frac{b}{h+b}} - \sqrt{2PD \frac{h+b}{hb}} \quad (6)$$

$$s = -\sqrt{\frac{2PD}{b}} \sqrt{\frac{b}{h+b}} \quad (7)$$

Natomiast minimalna wartość  $K$  wynosi:

$$K = \frac{PD}{Q} + cD \frac{bQ}{2} - \frac{b^2 Q}{2(h+b)}$$

Podstawiając za  $Q$  wartość optymalną zamówienia, otrzymujemy:

$$\min K = cD + \frac{PD\sqrt{hb}}{\sqrt{2PD} \sqrt{h+b}} - \frac{b^2 \sqrt{2PD} \sqrt{h+b}}{2(h+b)\sqrt{hb}} + \frac{h\sqrt{2PD} \sqrt{h+b}}{2\sqrt{hb}}$$

$$miK = cD + \frac{\sqrt{2PD}}{\sqrt{\frac{1}{h} + \frac{1}{b}}} \quad (8)$$

Po obliczeniu powyższych wielkości należy porównać minimalną wartość kosztu z kosztami ponoszonymi w przypadku braku materiału w celu ustalenia, czy w ogóle ma-

gazynować dany asortyment materiału. Jeżeli minimalny koszt jest mniejszy, stwierdzamy, że można stosować wzór na optymalną wielkość zamówienia.

### 3.3.2.2. Magazynowanie wielu pozycji materiałowych

Rozpatrzmy teraz sytuację, w której odbywa się magazynowanie kilku pozycji materiałowych. Problemem jest to, że dysponujemy ograniczoną powierzchnią magazynową. Przez  $A$  oznaczmy wielkość tej powierzchni, którą dysponujemy, a przez  $a_i$  powierzchnię niezbędną do przechowania jednostki  $i$ -tej pozycji. Jeżeli zatem  $y_i$  jest wielkością zamówienia  $i$ -tej pozycji, mamy ograniczenie:

$$\sum_{i=1}^n a_i y_i \leq A$$

Zakładamy dalej, że zamówienia dotyczące poszczególnych pozycji są realizowane natychmiastowo. Niedopuszczalne są braki poszczególnych pozycji. Ceny jednostkowe poszczególnych pozycji są stałe, niezależnie od wielkości zamówienia. Niech  $B_i$ ,  $K_i$ ,  $h_i$  oznaczają odpowiednio: intensywność zapotrzebowania, koszty stałe i koszty jednostkowe magazynowania odniesione do  $i$ -tej pozycji materiałowej. Przy tych założeniach koszty ogólne są sumą kosztów ponoszonych przy magazynowaniu poszczególnych pozycji. Mamy zatem następujące zadanie.

Należy wyznaczyć  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ , aby uzyskać

$$\min \sum_{i=1}^n \left( \frac{K_i B_i}{y_i} + \frac{h_i y_i}{2} \right) \quad \textcircled{9}$$

przy ograniczeniach

$$\sum_{i=1}^n a_i y_i \leq A$$

$$y_i > 0$$

Sformułowaliśmy w ten sposób problem programowania nieliniowego z nieliniową funkcją celu i liniowymi ograniczeniami. Jedną z metod, za pomocą których możemy uzyskać rozwiązanie takiego zadania, jest metoda mnożników Lagrange'a.

Można wykazać, że rozwiązanie optymalne zadania  $\textcircled{9}$  ma postać:

$$y_i^* = \sqrt{\frac{2K_i B_i}{h_i - 2\lambda^* a_i}}$$

gdzie  $\lambda^*$  jest optymalną wartością mnożników Lagrange'a w funkcji Lagrange'a dla powyższego zadania ( $\lambda^* < \infty$ ).

### 3.3.2.3. Optymalizacja poziomu zapasów w ciągu $n$ dni

Obecnie przedstawimy znacznie uproszczoną sytuację, jednakże najważniejsze czynniki wpływające na wybór reguł sterowania zapasami zostaną uwzględnione. W tym celu zastosujemy metodę programowania dynamicznego.

Założmy, że chcemy opracować plan zapasów dla  $N$  okresów. Ponumerujmy te okresy w kierunku przeciwnym, to znaczy od  $N$  do 1, czyli pierwszemu okresowi przypiszemy subskrypt  $N$ , a ostatniemu 1. Założmy także, że znamy wielkość zużycia danego materiału i oznaczmy go przez  $D_t$ . Czas dostawy (odstęp czasu między złożeniem zamówienia na materiał a jego dostarczeniem) jest bardzo krótki, a zatem możemy go pominąć w dalszych rozważaniach. Ekonomiczne wskaźniki zakupu materiałów wpływają na wielkość zamówienia, które może być większe od zużycia produkcyjnego.

Nadwyżka jest wówczas magazynowana aż do momentu jej wykorzystania. Magazynowanie tej nadwyżki wiąże się z pewnymi kosztami, które, podobnie jak koszty zakupu, muszą być uwzględnione przy układaniu programu zaopatrzenia materiałowego.

Jako funkcję-kryterium modelu przyjmijmy minimalizację kosztów zakupu i magazynowania materiałów przy uwzględnieniu warunków odnoszących się do zużycia.

Przyjmijmy następujące oznaczenia:

$x_t$  - wielkość zakupu materiałów,

$z_t$  - wielkość zapasu materiałów w końcu okresu  $t$ ,

$D_t$  - wielkość zużycia w okresie  $t$  (jest to wartość nieujemna).

Przypuśćmy, że koszty ogółem zależą od wielkości zakupu i zapasu materiałów.

Funkcja celu będzie miała postać:

$$\min K_t(x_t, z_t). \quad (10)$$

Przyjmijmy następujące warunki ograniczające:

- wielkość zakupu wyrażona jest za pomocą nieujemnych liczb całkowitych,

- zapas na koniec okresu planowania wynosi 0,
- zapasy w końcu okresu  $t$  równają się zapasom na początku okresu  $t$  powiększonym o wielkość zakupu i pomniejszonym o wielkość zużycia, co możemy zapisać w postaci:

$$z_t = z_{t-1} + x_t - D_t \quad (11)$$

- poziom zapasu wyrażony jest za pomocą nieujemnej liczby całkowitej.

Chcąc rozwiązać to zadanie metodą programowania dynamicznego, musimy wyjść od stanu w ostatnim okresie i przechodzić do stanu wyjściowego. Stan naszego systemu na początku każdego etapu określa nam wielkość zapasów na początku danego okresu.

Dalej wprowadźmy oznaczenia:

$f_t(z)$  - wartość odpowiadająca polityce minimalnych kosztów, gdy początkowy poziom zapasu wynosi  $z$ , a do końca horyzontu planu zostało  $t$  okresów,

$x_t(z)$  - wielkość zakupu odpowiadająca  $f_t(z)$ .

Jak już założyliśmy, wielkość zapasu na koniec horyzontu ma wynosić zero, więc:

$$f_t(0) = 0, \quad \text{dla } t = 0. \quad (12)$$

Przechodząc do kolejnego etapu,  $t = 1$ , stwierdzamy, że wielkość zapasu  $z$  na początku tego okresu może być dowolną liczbą pochodzącą z przedziału  $(0, D_1)$  (wielkość zakupu wynosi wówczas  $D_1 - z$ ), taką, aby zaspokoić wielkość zużycia produkcyjnego.

Wynika stąd, że:

$$f_1(z) = \min K_1(D_1 - z, 0), \quad \text{dla } z = 0, 1, \dots, d_1 \quad (13)$$

Przejdźmy teraz do etapu  $t = 2$ . Jeżeli zapas na początku tego okresu wynosi  $z$ , a wielkość zakupu  $x$ , to koszt dla tego etapu wynosi:

$$K_2 = f_2(x, z + x - D_2) + f_1(z + x - D_2), \quad (14)$$

przy założeniu, że zastosowaliśmy politykę optymalną dla  $t = 1$ . Wartość  $z$  pochodzi z przedziału  $(0, D_1 + D_2)$ , gdyż zapas na początku okresu może wynosić 0 (gdy przewidujemy zakupy w tym okresie o wielkości większej lub równej zużyciu) lub co najwyżej  $D_1 + D_2$  (gdy nie przewidujemy zakupów do końca horyzontu planu). Optymalną wielkością  $x$  jest taki zakup materiałów, który minimalizuje powyższą sumę, czyli:

$$f_2(z) = \min \{ K_2(x, z + x - D_2) + f_1(z + x - D_2) \},$$

gdzie:

$$z = 0, 1, \dots, D_1 + D_2,$$

a minimalizacji dokonujemy po wartościach  $x \in (D_2 - z, D_1 + D_2 - z)$ .

Znając wartość  $f_2(z)$ , możemy wyznaczyć  $f_3(z)$  i kolejno wartości aż do  $f_N(z_0)$ , gdzie  $z_0$  - poziom zapasów na początku okresu planistycznego.

Ogólną postać zależności rekurencyjnej można przedstawić za pomocą wzoru:

$$f_i(z) = \min \{ K_i(x, z + x - D_i) + f_{i-1}(z + x - D_i) \}; \quad (15)$$

gdzie:

$$z = 0, 1, \dots, D_1 + D_2 + \dots + D_i,$$

a minimalizacji dokonujemy po wartościach:

$$x \in (D_i - z, D_1 + D_2 + \dots + D_i - z).$$

Wartości  $f_0(0)$  i  $f_1(z)$  można obliczyć z równań funkcyjnych, można także obliczyć kolejno wartości  $f_2(0), f_2(1), \dots, f_2(D_1 + D_2)$ , a następnie  $f_3(0), f_3(1), \dots, f_3(D_1 + D_2 + D_3)$ , aż dojdziemy do  $f_{N-1}(0), f_{N-1}(1), \dots, f_{N-1}(D_1 + D_2 + \dots + D_{N-1})$  i  $f_N(z_0)$ .

Aby teraz określić optymalną strategię zakupów, sprawdzamy poziom zakupów  $x_N(z_0)$ , odpowiadający wartości  $f_N(z_0)$ . Przechodząc do kolejnego etapu, przyjmujemy, że początkowy poziom zapasu wyniesie  $z_0 + x_N(z_0) - D_N$ . Dla tego poziomu wyznaczamy poziom zakupu, który odpowiada wielkości  $f_{N-1}(z_0 + x_N(z_0) - D_N)$ . W ten sam sposób postępujemy w kolejnych etapach. W wyniku tego otrzymujemy optymalną strategię zakupów, odpowiadających minimum funkcji kosztów dla całego horyzontu planowania.

Powyższe zagadnienie charakteryzuje się tym, że wraz z wydłużaniem horyzontu planu w większości przypadków zmienia się postać strategii optymalnej. Dopiero przy zastosowaniu odpowiednio długiego horyzontu możemy powiedzieć, że otrzymaliśmy rozwiązanie, które minimalizuje wartość łącznych kosztów.

#### 3.3.2.4. Model optymalnej liczby części zamiennych

Pewien układ wytwarza unikatowe urządzenie. Do sprawnego funkcjonowania tego urządzenia potrzebny jest określony zapas części zamiennych. W przypadku gdybyśmy potrafili określić, ile razy należy wymienić daną część urządzenia w czasie jego eksploatacji. Pojawia się problem wyznaczenia wielkości tego zapasu.

Dana część może być wymieniana raz lub wielokrotnie. Tak więc możemy przynajmniej wyznaczyć rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $X$ , która określa,

ile razy należy wymienić daną część urządzenia. Inaczej mówiąc zmienna ta wyraża losowe zapotrzebowanie na część zamienną w okresie eksploatacji obiektu.

Niech  $p_x = P(X = x)$  oznacza prawdopodobieństwo tego, że daną część należy wymienić  $x$  razy, gdzie  $x = 0, 1, 2, \dots, N$ , przy czym  $N$  określa górną granicę liczby możliwych wymian.

Oczywiście mogą zaistnieć dwie sytuacje:

- 1) część zamienna będzie wytwarzana w czasie produkcji urządzenia i wtedy koszt będzie niższy;
- 2) część będzie wytwarzana osobno i z uwagi na technologię koszt wytwarzania będzie większy.

Niech  $k_1$  oznacza koszt wytwarzania części zamiennej w czasie produkcji urządzenia, :

a  $k_2$  - koszt części zamiennej wytworzonej osobno, przy czym  $k_2 > k_1$ . Jeżeli producent zobowiązał się na podstawie kontraktu, że wytworzy w czasie produkcji urządzenia dużą liczbę części zamiennych, to koszty wytwarzania będą niskie, ale część kosztów może okazać się zbędna, gdy zapotrzebowanie na części będzie mniejsze od stworzonego zapasu. Natomiast w przypadku małego zapasu części zamiennych producent poniesie początkowo niskie koszty, ale narazi się na straty w przyszłości, gdy tych części zabraknie.

Tak więc producent urządzenia poniesie stratę zarówno wówczas, gdy część będzie za dużo, jak i za mało w relacji do zapotrzebowania. Oczywiście straty te w obu przypadkach będą się różniły. Oznaczmy symbolem  $z$  zapas części zamiennych. Możemy wówczas określić następującą funkcję straty producenta:

$$h(x, z) = \begin{cases} h_1(z - x) & \text{gdy } x \leq z \\ (k_2 - k_1)(x - z) & \text{gdy } x > z \end{cases} \quad (16)$$

Analizowana wartość straty producenta, przyjmuje postać:

$z$  - zmienna decyzyjna;

Można wykazać, że dla realizacji postulatu optymalizacji analizowanej straty producenta należy wybrać taką liczbę  $z^*$  części zamiennych, która spełnia warunek:

$$F_{z-1} < \frac{k_2 - k_1}{k_2} \leq F_z \quad (18)$$

Istotne znaczenie dla podjęcia decyzji ma relacja między  $k_1$  oraz  $k_2$ . W przypadku gdy koszt dodatkowego wytwarzania części byłby wysoki w stosunku do kosztu produkcji tej części w trakcie wytwarzania urządzenia, należałoby wyprodukować dużą liczbę części zamiennych, najlepiej równą największej liczbie wymian. Z kolei, gdy  $k_1$  i  $k_2$  różnią się minimalnie, to preferowane byłoby rozwiązanie  $z^* = 0$ .

Popatrzmy na problem strat z punktu widzenia użytkownika obiektu. Oznaczmy:

$c_1$  - cena zakupionej części w czasie wytwarzania,

$c_2$  - cena zakupu w sytuacji awaryjnej, gdzie  $c_2 > c_1$ .

Użytkownik traci, gdy istnieje zbyt duży zapas części w relacji do zapotrzebowania. W przypadku gdy zapas części będzie zbyt mały, użytkownik poniesie stratę nie tylko z powodu wyższej ceny, lecz również na skutek tego, że obiekt (urządzenie) będzie przez pewien czas nieczynny, aż do momentu uzyskania niezbędnej części zamiennej.

Funkcja straty dla użytkownika przyjmie postać:

$$h(x, z) = \begin{cases} c_1(z - x) & \text{gdy } x \leq z \\ (c_2 - c_1 + l)(x - z) & \text{gdy } x > z \end{cases} \quad (19)$$

gdzie  $l$  oznacza stratę wynikającą z zakłócenia pracy obiektu.

Analogicznie, analizując postulat minimalizacji funkcji straty, należy wyznaczyć taką liczbę  $z$ , określającą liczbę części zamiennych, która spełnia warunek:

$$F_{z-1} < \frac{c_2 - c_1 + l}{c_2 + l} \leq F_x \quad (20)$$

Obecnie przedstawimy procedurę wyboru optymalnej liczby części zamiennych, posługując się przykładem.

### 3.4. PERSPEKTYWY ZASTOSOWANIA

**Modele optymalizacyjne**, jak to już wcześniej zostało zaznaczone mają głównie zastosowanie w **procesach podejmowania decyzji**. Chodzi tam głównie o to aby podjęta decyzja była decyzją optymalną z punktu widzenia przyjętej funkcji kryterium.

W projekcie badawczym pt. SYMULACYJNE MODELE POTENCJAŁU OBRONNEGO PAŃSTWA I POTENCJAŁU BOJOWEGO SIŁ ZBROJNYCH modele optymalizacyjne są praktycznie mało przydatne.

W pracach badawczych nad rozwiązaniem w/w problemu mogą być wykorzystane tylko niektóre z modeli optymalizacyjnych, do rozwiązania szczegółowych problemów badawczych i to też tylko w niewielkim zakresie.

Modele te zostały przedstawione w rozdziale 3 prezentowanego opracowania.

### BIBLIOGRAFIA DO ROZDZIAŁU 3

1. Gass S. L., Programowanie liniowe. Metody i zastosowania, PWN, W-wa 1980 r.
2. Grabowski W.. Programowanie matematyczne, PWE, W-wa 1982 r.
3. Praca zbiorowa pod red. E. Ignasiaka, Badania operacyjne, PWE, W-wa 1997 r.
4. Praca zbiorowa pod red. K. Kukuły, Badania operacyjne w przykładach i zadaniach, PWE, W-wa 1996 r.
5. Sienkiewicz P., Inżynieria systemów, MON. W-wa 1983 r.
6. Trzaskalik T., Modelowanie optymalizacyjne, Wyd. ABSOLWENT, Łódź 2000 r.
7. Witt R., Metody programowania nieliniowego, WNT, W-wa 1986 r.
8. Zorychta R., Ogryczak W., Programowanie liniowe i całkowitoliczbowe, WNT, W-wa 1986

## 4. MODELE TAKSONOMICZNE

### 4.1. *Istota modelu taksonomicznego*

Teoria badań potencjałowych bazuje głównie na dwóch klasach metod - analitycznych i heurystycznych, przy czym największe znaczenie praktyczne mają tzw. metody mieszane, z ewentualną przewagą jednej bądź drugiej klasy metod teoretycznych. W efekcie powstały dwie odrębne podklasy metod - metody ilościowo-jakościowe i jakościowo-ilościowe. Podejście analityczne bazuje na zdeterminowanych wzorach i formułach obliczeniowych i posługuje się z reguły tzw. syntetycznym wskaźnikiem jakości. Podejście heurystyczne oparte jest na różnorodnych systemach wartościowania i na rozmaitych technikach eksperckich, posilkując się zasadniczo różnymi systemami wag, rang oraz współczynników wagowych.

Prezentowana poniżej taksonomiczna metoda wyznaczania potencjału bojowego (TAX) należy w zasadzie do klasy metod analitycznych (statystycznych), jednak ze względu na specyfikę badań potencjałowych wykorzystuje również pewne systemy tzw. rang potencjałowych, pozwalających uwzględnić niektóre aspekty jakościowej oceny zdolności bojowych.

Szeroko wykorzystywane w badaniach stosowanych metody taksonomiczne należą do grupy metod numerycznych, bazujących na statystycznej analizie porównawczej. Generalnie metody taksonomiczne służą do rozwiązywania problemów porównywalności oraz porządkowania danej zbiorowości, ze względu na poziom przyjętego miernika, będącego syntezą wielo cechowego kryterium jakości. Pozwalają klasyfikować (porządkować, grupować) obiekty w wielowymiarowej przestrzeni ich charakterystyk.

Głównym celem badania taksonomicznego jest porządkowanie zbioru obiektów ze względu na poziom wielo cechowego zjawiska (wskaźnika). Mówiąc inaczej, metody taksonomiczne pozwalają klasyfikować (porządkować, grupować) obiekty w wielowymiarowej przestrzeni ich cech (charakterystyk).

Podstawowymi pojęciami w taksonomii są pojęcia obiektu oraz cechy. Obiektami są jednostki badania podlegające klasyfikacji.

$$Q = \{Q_n; n = \overline{1, N} \} \quad (1)$$

gdzie:  $Q_n$  - n-ty obiekt zbioru  $Q$ ;

$N$  - liczność zbioru obiektów.

Przedmiotem klasyfikacji nie jest oczywiście jeden obiekt, lecz zbiór obiektów  $Q$ . Specyficznym obiektem badania są różnorodne formy struktur organizacyjnych (bojowych), które mogą być także analizowane metodami taksonomicznymi.

Pojęcie obiektu może obejmować dowolne elementy (zbiory) typologiczne, będące przedmiotem badań. Obiektami mogą być zarówno elementy proste (jednorodne) np. systemy broni i uzbrojenia, jak również dowolne elementy struktury bojowej. Przykładowo pod pojęciem obiektu będziemy rozumieć: systemy broni, stanowiska dowodzenia, węzły łączności, składnice i bazy materiałowo-techniczne itp. Do klasy obiektów grupowych (strukturalnych) będziemy przykładowo zaliczać elementy struktury bojowej takie jak: oddziały i pododdziały, związki taktyczne i operacyjno-taktyczne, zgrupowania operacyjne wojsk a także sztaby, służby itd.

Cechami są właściwości obiektów (jednostek) badanego zbioru  $Q$ , wyodrębnione specjalnie ze względu na przyjęte kryterium klasyfikacji obiektów. Zbiór cech przyjętych do opisu klasyfikowanych obiektów będziemy oznaczać symbolem  $X$ :

$$X = \{X_k; k = \overline{1, N}\} \quad (2)$$

gdzie:

$X_k$  - k-ta cecha opisująca obiekt;

$K$  - liczność zbioru cech.

W zależności od rodzaju i klasy rozpatrywanego obiektu należy zdefiniować odpowiedni zbiór cech diagnostycznych opisujących właściwości tych obiektów z punktu widzenia potrzeb badawczych. Przykładowo analizując złożone systemy broni (nosicieli uzbrojenia) będziemy posługiwać się adekwatnym do tego systemu zbiorem danych taktyczno-technicznych. Przy ocenie możliwości zespołu sił będziemy operować zbiorem cech (parametrów) charakteryzujących szeroko rozumiany potencjał bojowy tego zespołu.

Cechy charakteryzujące badany obiekt nazywane są cechami diagnostycznymi, które dla potrzeb badań potencjałowych będziemy nazywać cechami potencjałowymi.

Metody taksonomii numerycznej ze względu na swoje walory użytkowe znajdują szerokie zastosowanie w badaniach wojskowych, gdzie wykorzystywane są przede wszystkim do ilościowo-jakościowej analizy i oceny różnych systemów wojskowych. Szczególnie interesującym kierunkiem zastosowań metod taksonomicznych jest wykorzystanie ich w badaniach różnorodnych potencjałów bojowych w tym zarówno złożonych systemów broni, jak też potencjałów zgrupowań bojowych czy do wyznaczania tzw. stosunku sił dynamicznie formowanych zgrupowań bojowych, zespołów sił itp.

#### 4.1.1. Cecha stymulanta i destymulanta

W zbiorze cech diagnostycznych  $X$  wybranych do opisu porównywanych obiektów mogą znajdować się wielkości mające różny kierunek wpływu na badane zjawisko (kryterium), w związku z czym wyróżnia się tzw. zmienne stymulanty i zmienne destymulanty.

Zmiennymi stymulantami ( $S$ ) nazywane będą takie wielkości, których większe wartości świadczą o wyższym poziomie badanego zjawiska, a zmiennymi destymulantami ( $D$ ) nazywane będą takie cechy diagnostyczne, których spadek wartości świadczy o wyższym poziomie przyjętego kryterium.

Stymulantą (maksymantą) będziemy nazywać funkcję (cechę) monotoniczną rosnącą, o postaci:

$$(x_{i(j)} > x_{k(j)}) \Rightarrow (y_{i(j)} > y_{k(j)}) \quad (3)$$

Wyrażenie (3) oznacza, że dla dowolnych dwóch wartości cech  $x_{i(j)}$  oraz  $x_{k(j)}$ , które pozostają w relacji większości  $x_{i(j)} > x_{k(j)}$ , ustala się preferencje wartości  $y_{i(j)}$  nad  $y_{k(j)}$ . Stymulantami są więc te cechy, których wzrost wartości bezwzględnych  $x_{(j)}$  powoduje wzrost wartości względnych  $y_{(j)}$  danej cechy.

Destymulantą (minimantą) nazywamy funkcję (cechę) monotoniczną malejącą, czyli:

$$(x_{i(j)} < x_{k(j)}) \Rightarrow (y_{i(j)} > y_{k(j)}) \quad (4)$$

W tym przypadku w relacji mniejszości  $x_{i(j)} < x_{k(j)}$  ustala się preferencje wartości  $y_{k(j)}$  nad  $y_{i(j)}$ . Malejące wartości bezwzględne destymulant  $x_{(j)}$  powodują zwiększanie się wartości względnych  $y_{(j)}$  cechy.

Nierzadko w badaniach porównawczych występują cechy przedziałowe, zwane nominantami. Istotą nominanty jest osiągnięcie ściśle określonej wartości, tzw. wartości nominalnej, która zmienia monotoniczny charakter funkcji, np. z rosnącej na malejącą lub odwrotnie.

#### 4.1.2. Klasyfikacja cech diagnostycznych

Z wprowadzonych określeń (2) i (3) wynika, że wyodrębnione rodzaje cech diagnostycznych możemy zapisać w kategoriach minimaksowych za pomocą następującego wyrażenia:

$$x_{0(j)} = \begin{cases} x_{\max(j)} \Leftrightarrow j \in S \\ x_{\text{nom}(j)} \Leftrightarrow j \in N \\ x_{\min(j)} \Leftrightarrow j \in D \end{cases} \quad (5)$$

gdzie: S - zbiór cech stymulant;  
D - zbiór cech destymulant;  
N - zbiór cech nominant.

Dla potrzeb komputerowej procedury badań potencjałowych - zwanej też taksonomiczną formułą potencjałową (TAX) wprowadzona została nowa kategoria cech potencjałowych tzw. nullanta, której przypisanie danej cesze formalnie eliminuje jej udział w kształtowaniu globalnego wskaźnika jakości. Wobec tego zbiór cech potencjałowych X dzieli się ostatecznie na 4-klasy:

$$x_{0(j)} = \begin{cases} \mathbf{S(+)- stymulanta} \\ \mathbf{N(=) - no min anta} \\ \mathbf{D(-)- destymulanta} \\ \mathbf{Z(0)- nullanta} \end{cases} \quad (6)$$

Jak wynika z przyjętego systemu oznaczeń:

- cecha stymulanta S(+) wpływa monotonicznie rosnąco na kształtowanie się globalnego wskaźnika jakości Q;
- cecha nominanta S(=) zachowuje stały poziom wskaźnika Q w nominalnym zakresie zmienności cechy diagnostycznej;
- cecha destymulanta D(-) wpływa monotonicznie malejąco na kształtowanie się globalnego wskaźnika jakości Q;
- cecha nullanta Z(0) eliminuje swój udział w jakimkolwiek kształtowaniu globalnego wskaźnika jakości Q.

Przy konstruowaniu mierników taksonomicznych cechy diagnostyczne są z reguły sumowane, zachodzi więc potrzeba takiego przekształcenia zmiennych destymulant  $x_{i(j)}$  na zmienne stymulanty  $x_{i(j)}$ , aby większe wartości cech przekształconych świadczyły o wyższym poziomie badanego procesu.

Dla potrzeb pracy została wybrana metoda ilorazowa o ogólnej postaci:

$$x_{i(j)} = 1/x_{i(j)}; \quad x_{i(j)} \neq 0 \quad (7)$$

gdzie:  $x_{i(j)}$  - pierwotna cecha destymulanta.

Przekształcenie (8) ze względu na jednoznaczność i prostotę pozwala na nadanie przekształconym zmiennym odpowiedniej interpretacji fizycznej (merytorycznej), np. potencjałowej.

#### 4.1.3. Zasady normalizacji cech diagnostycznych

Zwykle cechy wykorzystywane do opisu klasyfikowanych obiektów są wyrażane w różnych jednostkach miary, a więc mają różne miana. Ponadto mogą być różnych typów (ilościowe, jakościowe), a ich realizacje wyrażone w różnych skalach (przedziałowej, stosunkowej, nominalnej, rangowej itp.). Widzimy zatem, że nawet jeśli cechy mają identyczne miana, nie zawsze mogą być porównywane ze sobą w sposób bezpośredni, dlatego wyznaczanie jakichkolwiek miar podobieństwa obiektów na podstawie bezwzględnych wartości cech jest zazwyczaj niemożliwe.

Sprowadzanie cech diagnostycznych do wspólnego układu porównawczego, którego celem jest m.in. eliminacja wpływu jednostek miary na wyniki badań, będziemy

nazywać normowaniem. Oznacza ono ujednocianie (standaryzację) wartości cech z punktu widzenia określonego kryterium.

Problem ten, pomimo że pojawia się w każdej statystycznej analizie porównawczej, nie jest dotąd ostatecznie rozwiązany, czego dowodem jest duża dowolność wyboru formuły ujednociania (normowania) cech.

Wychodząc z potrzeb analizy porównawczej, normalizację cech będziemy realizować przeliczając bezwzględne wartości cechy na wartości względne<sup>8</sup>.

Uniwersalne normowanie z punktu widzenia potrzeb analizy porównawczej powinno spełniać następujące postulaty:

1°. Wartości unormowane są liczbami niemianowanymi, niezależnie od rodzaju cech, których wartości są transformowane. Warunek ten nosi nazwę postulatu addytywności i jest warunkiem koniecznym przekształcenia normalizacyjnego.

2°. Wartości unormowane są liczbami nieujemnymi:

$$y_{i(j)} \geq 0 \quad (8)$$

3°. Wartości unormowane należą do skończonego, uniwersalnie unormowanego przedziału liczbowego, co oznacza:

3.1°. stałość rozstępu  $R(y_{(j)})$ :

$$y_{\max(j)} - y_{\min(j)} = R(y_{(j)}) = \text{const} \quad (9)$$

3.2°. stałość wartości ekstremalnych, tj.:

$$(y_{\min(j)} = y_{\min(l)}) \wedge (y_{\max(j)} = y_{\max(l)}) \quad (10)$$

4°. W przedziale wartości unormowanych zachowana jest jednolita kierunkowo preferencja wartości, tj.

$y_{\min(j)}$  - wartość najmniej korzystna;

$y_{\max(j)}$  - wartość najbardziej korzystna (optymalna).

Często żąda się, aby obszar zmienności  $R(y_{(j)})$  był jednostkowy, czyli:

---

<sup>8</sup> Operacja normowania cech stanowi część szerszego zagadnienia transformacji zmiennej losowej, która polega na przekształceniu danej cechy (zmiennej losowej) na inną cechę zmienną losową o pożądanym

$$R(y_{(j)}) \in \langle 0,1 \rangle \quad (11)$$

co implikuje następujące ograniczenia na wartości unormowane:

$$y_{\min(j)} = 0 \wedge y_{\max(j)} = 1 \quad (12)$$

Wartości z przedziału  $(y_{\min(j)}, y_{\max(j)})$  interpretuje się odpowiednio do stosowanej skali psychologicznej, np. najmniej korzystna, umiarkowana, umiarkowanie korzystna itp.

#### 4.1.4. Metoda wyznaczania wag cech diagnostycznych

Wykorzystanie w sposób bezpośredni unormowanych cech diagnostycznych  $y_{nk}$  uwolnionych np. poprzez normalizację od miana, oznacza przyjęcie założenia o przypisaniu im jednakowego znaczenia w opisie badanego obiektu. Takie podejście, zwłaszcza w taksonomicznych badaniach potencjałowych nie zawsze jest uzasadnione, gdyż w zbiorze cech diagnostycznych znajdują się zazwyczaj wielkości o zróżnicowanym znaczeniu z punktu widzenia programu badań.

Celem uwzględnienia niejednakowego wpływu poszczególnych cech diagnostycznych w miarach opisujących klasyfikowane obiekty typu (1) wprowadza się stosowne systemy wag ( $w_k$ ).

Generalnie wyodrębnia się dwie zasadnicze kategorie współczynników wagowych, dotyczących odpowiednio:

- merytorycznych wartości cech diagnostycznych oraz
- statystycznych właściwości tych cech.

W docelowej aplikacji komputerowej formuły TAX będą nas interesować wyłącznie wagi opisujące merytoryczną rangę danej cechy w strukturze rozpatrywanej populacji cech.

Wszystkie rodzaje współczynników wagowych typu  $w_k$  będą generalnie obliczane według jednolitej, wspólnej formuły, opartej na metodzie rangowania, której ogólna postać jest następująca:

Rangi  $r_k$  poszczególnych cech diagnostycznych:

$$r_k \in N; k = \overline{1, K} \quad (13)$$

będziemy określać zmodyfikowaną metodą rangowania.

Najprostszą metodą normowania jest rangowanie polegające na transformacji pierwotnych wartości cech na wartości skali porządkowej. Wartościom bezwzględny przyporządkowuje się liczby naturalne (numery, rangi) z początkowego przedziału zbioru liczb  $N$ .

Reguła normowania rangowego ma ogólną postać:

$$x_{1(j)} \rightarrow y_{\min(j)} = 1, \dots, x_{0(j)} \rightarrow y_{\max(j)} = n \quad (14)$$

Dla cech stymulant ( $S$ ) i destymulant ( $D$ ) mamy odpowiednio:

$$x_{\max(j)} \rightarrow y_{\min(j)} = 1, \dots, x_{\min(j)} \rightarrow y_{\max(j)} = n; \quad j \in S \quad (15)$$

$$x_{\min(j)} \rightarrow y_{\min(j)} = 1, \dots, x_{\max(j)} \rightarrow y_{\max(j)} = n; \quad j \in D \quad (16)$$

Skończony przedział zmienności rang generowany jest każdorazowo liczebnością zbiorowości statystycznej, czyli:

$$y_i(j) \in \langle 1, n \rangle \quad (17)$$

Rangowanie (14) odwzorowuje stany cech na wartości dyskretne o stałym, jednostkowym skoku niezależnie od rzeczywistych różnic występujących pomiędzy wartościami bezwzględnymi cech. Zbiór rang odzwierciedla jedynie relacje porządkowe ustalone na zbiorze wartości pierwotnych. Ogólną ideę tej metody wykorzystamy przy budowie formuły służącej do określania tzw. rang diagnostycznych  $r_k$ , niezbędnych przy wyznaczaniu współczynników wagowych cech diagnostycznych według wyrażenia (14).

Rangi  $r_k$  poszczególnych cech diagnostycznych będziemy generować według ogólnej formuły rangowania:

$$x_{0(i)} \rightarrow r_{\min(i)} = 0, \dots, x_{1(j)} \rightarrow r_{\max(j)} = n \quad (18)$$

gdzie:

$r_{\min(i)}$  - oznacza minimalną wartość rangi przypisaną  $i$ -tej cesze odgrywającej relatywnie najmniejszą rolę w zbiorze cech;

$r_{\max(j)}$  - oznacza maksymalną wartość rangi przypisaną  $j$ -tej cesze odgrywającej relatywnie największą rolę w zbiorze cech.

Zgodnie ze wzorem (18) przyporządkowanie randze wartości zerowej oznacza wyeliminowanie danej cechy. Im wyższą rangę  $r_k$  przyporządkujemy k-tej cesze, tym większą odgrywać ona będzie rolę w danym systemie klasyfikacyjnym<sup>9</sup>.

Dodatkowo przyjmujemy następujące założenia:

1. różnym cechom będziemy mogli przyporządkować te same wartości rang;
2. liczbowe różnice wartości poszczególnych rang nie muszą być ani stałe, ani tym bardziej jednostkowe;
3. skończony przedział zmienności rang nie jest determinowany liczbą cech, a jedynie przyjętym systemem merytorycznych preferencji poszczególnych cech.

Zaproponowana metoda (4) wyznaczania współczynników wagowych  $w_k$  cech diagnostycznych ze względu na swoją rachunkową prostotę i psychologiczną interpretację rang diagnostycznych  $r_k$  stanowić będzie jeden z elementów decyzyjnego oddziaływania - obok systemu stymulant, podczas generowania syntetycznych wskaźników jakości badanych obiektów.

#### **4.2. Formalny zapis zagadnienia klasyfikacji**

Termin klasyfikacja może być rozpatrywany w wielu kontekstach znaczeniowych. Dla naszych celów przez klasyfikację będziemy rozumieć czynność podziału zbioru obiektów na podzbiory według ustalonego kryterium. Efektem przeprowadzenia procedury klasyfikacyjnej są grupy obiektów podobnych ze względu na przyjęte kryterium.

Zagadnienie klasyfikacji formalnie możemy przedstawić w następujący sposób. Dany jest N-elementowy zbiór  $Q$  zawierający obiekty  $Q_n$  będące przedmiotem badań:

$$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \dots, Q_N\} \quad (19)$$

---

<sup>9</sup> Metoda wyznaczania rang potencjałowych nawiązuje do powszechnie stosowanego w pracach różnych komisji ekspertów systemu punktowego. Każdy z ekspertów może wówczas przydzielić każdej cesze pewną liczbę punktów od 0 do  $P$  (np.  $P = 10$ ), kierując się znaczeniem przypisanym tej cesze. Taki sposób rangowania jest prosty i umożliwia nadanie jednakowego znaczenia wielu cechom oraz zmianę wyjściowej listy cech.

Podzielić zbiór  $Q$  na  $P$  podzbiorów (grup typologicznych) ze względu na przyjęte kryterium podziału:

$$Q_1, Q_2, \dots, Q_p, \dots, Q_P \quad (20)$$

przy czym:  $1 \leq p \leq N$ ,

aby były spełnione następujące warunki:

$$1^\circ \quad Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_P = Q; \quad (21)$$

$$2^\circ \quad Q_i \cap Q_j = \emptyset, \quad \text{dla: } i, j = \overline{1, P}; \quad i \neq j; \quad (22)$$

$$3^\circ \quad Q_p \neq \emptyset, \quad \text{dla: } p = \overline{1, P}; \quad (23)$$

Liczba grup typologicznych  $P$  jest zazwyczaj nieznana.

**Warunek 1°** nosi nazwę warunku adekwatności i oznacza, że suma wyodrębnionych podzbiorów wyczerpuje zbiór podlegający podziałowi.

**Warunek 2°** nazywa się warunkiem rozłączności grup typologicznych i oznacza, że poszczególne grupy nie zawierają żadnych elementów wspólnych.

Ostatni **warunek 3°** mówi o tym, że w każdej grupie typologicznej musi znaleźć się przynajmniej jeden element (obiekt).

Powyższe warunki są wystarczające do przeprowadzenia formalnej klasyfikacji każdego zbioru obiektów. W jej wyniku otrzymuje się grupy typologiczne, w szczególności jednoelementowe, gdy  $P = N$  lub jedną grupę zawierającą wszystkie elementy zbioru, gdy  $P = 1$ , składające się z obiektów jednorodnych ze względu na przyjęte kryterium podziału.

W zagadnieniach praktycznych klasyfikacja powinna odznaczać się - oprócz warunków formalnych - 1°, 2°, 3° dodatkowo następującymi właściwościami:

- obiekty znajdujące się w tej samej grupie typologicznej powinny być do siebie jak najbardziej podobne;

- obiekty znajdujące się w różnych grupach typologicznych powinny być do siebie jak najmniej podobne.

Właściwości te oznaczają, że w wyniku klasyfikacji badanych jednostek (obiektów) uzyskuje się takie grupy typologiczne, które są bardziej jednorodne ze względu na wartości opisujących je cech niż zbiór wyjściowy, niepodzielony.

Oczywistym jest, że poszczególne zbiory typologiczne  $Q_n$  otrzymane w wyniku pierwszego podziału mogą podlegać dalszym podziałom ze względu na kolejne (coraz węższe) kryteria klasyfikacyjne. Wszystkie podziały wielopoziomowe muszą spełniać warunki 1°, 2°, 3°, będące warunkami koniecznymi poprawnej klasyfikacji obiektów.

#### 4.2.1. Formuła syntetycznej miary oceny

Do oceny stopnia podobieństwa obiektów wielocechowych stosuje się różne zdefiniowane miary podobieństwa. Miary te wskazują, w jakim stopniu porównywane jednostki są do siebie podobne ze względu na wartość opisujących je cech diagnostycznych. Ogół miar podobieństwa obiektów wielocechowych można podzielić na dwie zasadnicze kategorie:

- miary odległościowe (geometryczne);
- miary wskaźnikowe (algebraiczne).

Odległości między obiektami są takimi miarami, których mniejsze wartości wskazują na mniejsze różnice wartości cech diagnostycznych w wyróżnionych obiektach, a więc na większe podobieństwo tych jednostek z uwagi na przyjęte cechy.

Mierniki oparte na miarach odległościowych dzielą się na dwie grupy: mierniki wzorcowe i mierniki bezwzorcowe. W pierwszym przypadku korzysta się z pojęcia obiektu wzorcowego, którym jest bądź wyróżniony jeden z obiektów badanych, bądź hipotetyczny obiekt, tworzony specjalnie dla potrzeb badawczych.

Wskaźniki podobieństwa obiektów wielocechowych są natomiast takimi miarami, których większe wartości oznaczają większe podobieństwo porównywanych jednostek ze względu na opisujące je cechy. Bliżej rozpatrzemy rodzinę miar wskaźnikowych, w obrębie której zostanie przedstawiona nowa propozycja miary, opracowana specjalnie dla potrzeb badań taksonomicznych.

Taksonomiczne miary wskaźnikowe zastępują opis badanych obiektów wielocechowych opisem za pomocą jednej, zagregowanej wielkości. W efekcie klasyfikacja obiektów wielocechowych oparta na wskaźnikach syntetycznych sprowadza się do podziału zbioru obiektów według jednej zmiennej (jednego kryterium), co zasadniczo ułatwia postępowanie klasyfikacyjne. Mierniki te są stosowane do liniowego porządkowania obiektów wielocechowych ze względu na poziom zaproponowanego wskaźnika.

Punktem wyjścia do skonstruowania taksonomicznego miernika wskaźnikowego jest macierz  $[X]$  zawierająca wartości cech diagnostycznych  $[x_1, x_2, \dots, x_k]$ . Z formalnego punktu widzenia wskaźnik syntetyczny ( $\lambda$ ) jest funkcją przekształcającą macierz wartości cech  $[X]$  w  $N$ -wymiarowy wektor ( $G$ ), mający postać:

$$\lambda: X \rightarrow G \quad (24)$$

przy czym:  $G = \langle g_1, g_2, \dots, g_n, \dots, g_N \rangle$ .

Poszczególne składowe  $\langle g_n \rangle$  wektora  $G$  będziemy utożsamiać z taksonomicznymi wskaźnikami jakości  $n$ -tego obiektu.

Jednym z bardziej popularnych mierników syntetycznych jest wskaźnik konstruowany na podstawie średniej arytmetycznej typu:

$$g_n = \sum_{k=1}^k y_{nk} ; \quad n = \overline{1, N} \quad (25)$$

gdzie:  $y_{nk}$  - unormowana wartość  $k$ -tej cechy w  $n$ -tym obiekcie.

Niekiedy do syntetycznego wskaźnika (2) wprowadza się wagi cech diagnostycznych, co daje formułę:

$$g_n = \sum_{k=1}^k w_k y_{nk} ; \quad n = \overline{1, N} \quad (26)$$

gdzie:  $w_k$  - współczynnik wagowy  $k$ -tej cechy diagnostycznej.

Interpretacja taksonomiczna wskaźników (25) i (26) jest następująca: obiekt odznacza się tym wyższym poziomem rozwoju, im większą wartość przyjmuje odpowiedni wskaźnik syntetyczny.

#### 4.2.2. Schemat procedury badania taksonomicznego

Teoretyczną podstawą funkcjonowania formuły TAX są statystyczne metody i techniki stosowane szeroko w taksonomii numerycznej do relatywizowania obiektów w wielokryterialnej przestrzeni cech diagnostycznych (w tym przypadku potencjałowych).

Metody taksonomiczne służą do rozwiązywania problemów porównywalności oraz porządkowania danej zbiorowości ze względu na poziom przyjętego miernika, będącego syntezą wielocechowego kryterium jakości.

W procedurze badania taksonomicznego wyróżnia się następujące zasadnicze etapy (rys. 4-1):

- 1 - sformułowanie problemu badawczego;
- 2 - dobór cech diagnostycznych i skali ich pomiaru;
- 3 - przygotowanie danych liczbowych (statystycznych);
- 4 - wybór miary podobieństwa obiektów;
- 5 - wybór procedury badawczej;
- 6 - statystyczne opracowanie cech diagnostycznych;
- 7 - klasyfikacja badanych obiektów;
- 8 - weryfikacja i interpretacja wyników.

**1.** Etapem startowym badania taksonomicznego jest zdefiniowanie problemu badawczego, celem ustalenia głównych założeń badawczych, podstawowego zbioru obiektów podlegających badaniom i ogólnych kryteriów klasyfikacyjnych.

**2.** Drugi etap polega na doborze wskaźników mających opisywać klasyfikowane obiekty, czyli tzw. cech diagnostycznych. Spośród szerokiego zbioru charakterystyk danego obiektu należy wybrać cechy odznaczające się największą diagnostycznością, tj. adekwatnością względem badanego zjawiska (kryterium).

**3.** Na etapie trzecim należy zgromadzić niezbędne dane statystyczne będące liczbowymi realizacjami cech diagnostycznych dla poszczególnych obiektów. Uzyskuje się w ten sposób precyzyjną, liczbową charakterystykę klasyfikowanych obiektów. Zebrane i odpowiednio zweryfikowane dane utworzą macierz wartości cech diagnostycznych  $[X]$ ;

$$X = [x_{nk}]_{N \times K}, \quad (27)$$

której  $nk$ -ty element  $x_{nk}$  oznacza realizację  $k$ -tej cechy w  $n$ -tym obiekcie. Każdy obiekt  $Q_n \in Q$  będzie więc opisany za pomocą wektora cech:

$$X = [x_{nk}; k=1, K]; n=1, N. \quad (28)$$

Wektorowy zapis (28) pozwala interpretować geometrycznie poszczególne obiekty  $Q_n \in Q$ , jako punkty w  $K$ -wymiarowej przestrzeni cech.

**4.** Na kolejnym, czwartym etapie dokonuje się wyboru miary podobieństwa badanych obiektów, będącej jednostkowym, zagregowanym wskaźnikiem oceny (jakości) obiektu. Do syntetycznej oceny podobieństwa obiektów opisywanych przez wiele cech służą różnie definiowane miary podobieństwa i wskaźniki ocenowe. Ogólnie miarami tymi mogą być odległości taksonomiczne i syntetyczne wskaźniki jakości.

**5.** Bardzo ważnym etapem badania taksonomicznego jest wybór odpowiedniej metody klasyfikacyjnej, czyli procedury numerycznej adekwatnej do założonych celów badawczych. Ze względu na dużą różnorodność i zróżnicowaną efektywność stosowanych metod, wybór najbardziej właściwej jest zagadnieniem złożonym i odpowiedzialnym.

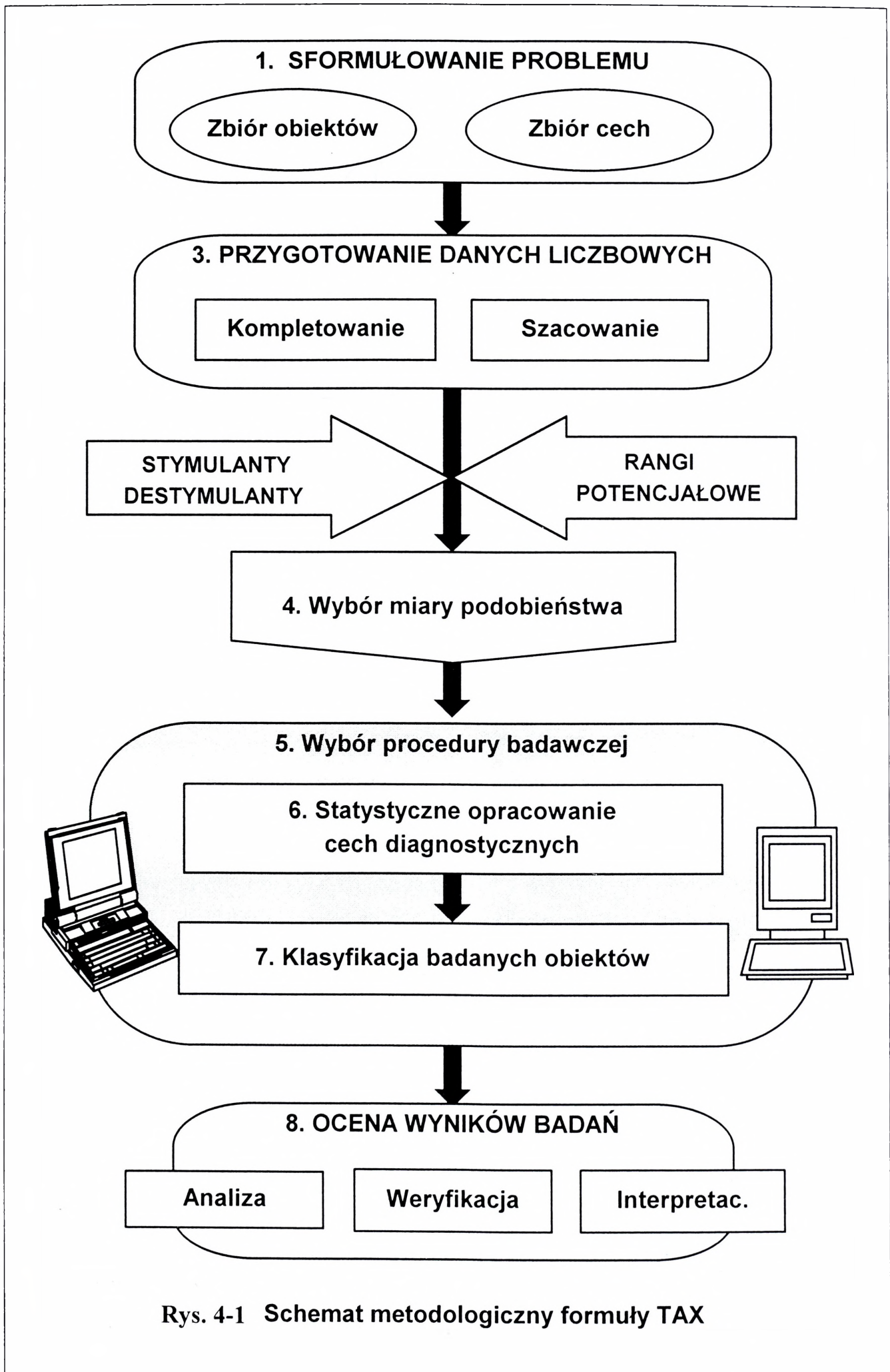
**6.** Etap szósty jest szczególnie istotny, jeśli weźmie się pod uwagę fakt, że zbiór cech diagnostycznych opisujących dany obiekt jest z reguły niejednorodny, zarówno w sensie odmienności poszczególnych właściwości, jak też ze względu na skalę liczbową i stosowane jednostki miary. Pierwotne (surowe, źródłowe) cechy diagnostyczne należy więc ujednoczyć i wzajemnie zrelatywizować, wykorzystując do tego celu rozmaite metody normowania cech.

**7.** Efektem zastosowania odpowiedniej procedury numerycznej jest wygenerowanie pewnego zbioru grup typologicznych (w szczególności jednoelementowych). Podstawą tej klasyfikacji - którą przeprowadza się na etapie - siódmym jest wektor miar podobieństwa badanych obiektów, będący np. syntetycznym wskaźnikiem jakości.

**8.** Ostatnim, ósmym etapem postępowania taksonomicznego jest statystyczna weryfikacja uzyskanych wyników i merytoryczna interpretacja poszczególnych wariantów klasyfikacyjnych oraz ich praktyczne wykorzystanie, zgodnie z celem badań.

**Etapy 1-4** można zaliczyć do czynności koncepcyjno-technicznych, poprzedzających działanie samej procedury badania taksonomicznego, a ostatnie dwa: 7 i 8 to realizacja zaplanowanego programu badawczego. Pozostałe dwa etapy - 5 i 6 procedury badawczej wymagają dysponowania adekwatnymi do potrzeb metodami badawczymi ściśle związanymi z docelową implementacją komputerową.

Z uwagi na dużą złożoność obliczeniową i liczne procedury natury statystycznej efektywne stosowanie metod taksonomicznych jest absolutnie uwarunkowane komputerowym wspomaganie praktycznie na wszystkich etapach docelowego systemu informatycznego.



Rys. 4-1 Schemat metodologiczny formuły TAX

W przypadku badań potencjałowych dodatkowym etapem procedury taksonomicznej TAX jest etap definiowania tzw. wektorów decyzyjnych jako:

D1 - stymulanty/destmulanty;

D2 - rangi potencjałowe.

Na tym etapie wprowadzane są do formuły TAX służbowe preferencje i dodatkowe uwarunkowania np. taktyczno-techniczne stawiane generowanym kategoriom potencjałowym, w zależności np. od celu prowadzonych analiz czy aktualnej sytuacji taktycznej na teatrze morskim.

Za pomocą wektorów decyzyjnych D1 i D2 można dynamicznie definiować adekwatną do aktualnych potrzeb strukturę generowanego potencjału - tak w sensie jakościowym, jak też w sensie ilościowym. Stąd wymóg, aby docelowa implementacja formuły TAX funkcjonowała w trybie interaktywnej procedury komputerowej, w atrakcyjnej technologii WINDOWS, na zasadzie bezpośredniego dialogu użytkownika z komputerem.

#### **4.3. Perspektywy zastosowania**

Metody taksonomiczne znajdują szerokie zastosowanie głównie w naukach ekonomicznych, w teorii organizacji i zarządzania, a także w naukach wojskowych. Na gruncie nauk wojskowych wykorzystywane są głównie do analizy i oceny możliwości bojowych zarówno złożonych systemów broni np. samolotów, czołgów, okrętów jak również do wyznaczania potencjałów bojowych dowolnie kompletowanych zgrupowań bojowych wojsk (sił) np. pod kątem określania tzw. stosunku sił.

O atrakcyjności metod taksonomicznych decydują ich znaczące walory techniczno-użytkowe i wysoka przydatność w badaniach stosowanych. Do zasadniczych zalet metod taksonomicznych należy zaliczyć:

- uniwersalizm i niezależność od podmiotu badań;
- elastyczność w konstruowaniu różnych miar podobieństwa;
- możliwość badania względem przyjętego wzorca;
- możliwość konstruowania syntetycznych (uogólnionych) wskaźników jakości;
- bezpośrednią transformację cech ilościowych we wskaźniki jakościowe;

- niezależność od skali, jednostek miary i występujących wielkości fizycznych;
- możliwość rekurencyjnego stosowania na różnych poziomach proceduralnych.

Szczególnie cenną zaletą metody taksonomicznej jest relatywnie duża jej prostota i wysoka efektywność rachunkowa, co implikuje szeroką podatność na komputeryzację, a tym samym zasadniczo podnosi jej rangę i użyteczność.

Reasumując, dotychczasowe rozważania można sformułować następujące uwagi i wnioski:

1. Intensywne wykorzystanie metod taksonomicznych w statystycznych badaniach porównawczych wynika z ich dużej uniwersalności, elastyczności i efektywności oraz z wysokiej sprawności obliczeniowej.
2. Metodologia badań taksonomicznych ściśle koreluje z założeniami teorii potencjału i w pełni odpowiada potrzebom relatywizacji oraz kryteriom typologicznej klasyfikacji grup (obiektów).
3. Efektywne wykorzystanie metod taksonomicznych wymaga opracowania nowych narzędzi i procedur badawczych adekwatnych do specyficznych potrzeb i uwarunkowań badań potencjałów bojowych.
4. Zgodnie z założeniami badań taksonomicznych pojęcie obiektu obejmuje bardzo szeroką klasę zbiorów (elementów) typologicznych i może dotyczyć zarówno złożonych systemów broni, jak też różnych elementów struktury organizacyjnej (bojowej); podobnie pojęcie cechy może odnosić się zarówno do danych taktyczno-technicznych, jak również do skwantyfikowanych charakterystyk opisujących dowolne właściwości tych obiektów.
5. Z uwagi na skalę i zakres badań potencjałowych (w sensie liczości zbioru obiektów i zbioru cech potencjałowych) efektywne posługiwanie się taksonomiczną formułą potencjałową uwarunkowane jest dysponowaniem odpowiednią implementacją komputerową oraz stosowną bazą danych taktyczno-technicznych.

Efektywne funkcjonowanie formuły TAX warunkuje odpowiednia aplikacja komputerowa, stanowiąca o jej praktycznej przydatności do badań rzeczywistych złożonych systemów broni jak też dowolnie agregowanych kategorii zespołowych potencjałów bojowych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Ficoń K., Zmodyfikowana metoda normowania cech diagnostycznych w badaniach taksonomicznych. Zeszyty Naukowe AMW 2/1995, Gdynia 1995.
2. Ficoń K., Propozycja jednostkowego wskaźnika jakości w badaniach taksonomicznych. Zeszyty Naukowe AMW 2/1995, Gdynia 1995.
3. Grabiński T., Wydymus S., Zeliaś A.: Metody doboru zmiennych w modelach ekonometrycznych. PWN, Warszawa 1988.
4. Grabiński T., Wydymus S., Zeliaś A.: Metody taksonomii numerycznej w modelowaniu zjawisk społeczno-gospodarczych. PWE, Warszawa 1990.
5. Hellwig Z., Wielowymiarowa analiza porównawcza i jej zastosowanie w badaniach wielocechowych obiektów gospodarczych. [w:] „Metody i modele ekonomiczno-matematyczne w doskonaleniu zarządzania gospodarką socjalistyczną”, red. W. Welfe, PWE, Warszawa 1981.
6. Nowak E., Metody taksonomiczne w klasyfikacji obiektów społeczno-gospodarczych. PWE, Warszawa 1990.
7. Pluta W., Wielowymiarowa analiza porównawcza w modelowaniu ekonometrycznym. PWN, Warszawa 1986.
8. Steczkowski J., Zeliaś A., Statystyczne metody analizy cech jakościowych. PWE, Warszawa 1981.
9. Wesołowski J., Modele decyzyjne rozwoju techniki. PWN, Warszawa 1987.

## 5. MODELE SYMULACYJNE

Wzrost złożoności systemów powoduje, że badanie ich funkcjonowania staje się coraz trudniejsze. Do takich właśnie złożonych systemów należą między innymi systemy wojskowe. Ponadto należy podkreślić, że badanie systemu rzeczywistego jest z reguły kosztowne i czasochłonne a w systemach wojskowych w wielu sytuacjach w ogóle niemożliwe.

Do charakterystycznych właściwości systemów wojskowych należy zaliczyć konieczność uwzględnienia aktywnego oddziaływania przeciwnika. Procesy zachodzące na polu walki mają najczęściej charakter procesów losowych. Odtwarzanie dynamiki funkcjonowania takich systemów oraz badanie ich wielopoziomowej struktury organizacyjnej za pomocą tradycyjnych metod badawczych może się okazać mało efektywne i niewystarczające. Wydaje się, że skuteczną metodą stosowaną do badania tej klasy systemów jest **modelowanie symulacyjne**. Metoda ta staje się tym bardziej atrakcyjna, że w połączeniu z techniką obliczeniową umożliwia przeprowadzenie na modelu wielokrotnych badań z możliwością wprowadzania zmian parametrów modelu.

Przed przystąpieniem do omówienia metody modelowania symulacyjnego wyjaśnienia wymagają takie pojęcia jak "**modelowanie symulacyjne**" oraz "**symulacja**". Proponowane w literaturze definicje wynikają z zastosowania symulacji w określonym celu, wiążą się z doświadczeniem autorów oraz wyrażają z reguły ich poglądy. Dla przykładu można przytoczyć kilka definicji tych pojęć.

"**Modelowaniem symulacyjnym**" nazywamy proces budowy modelu systemu rzeczywistego oraz przeprowadzanie eksperymentów symulacyjnych na tym modelu w celu poznania zachowania się systemu pod wpływem wewnętrznych i zewnętrznych czynników lub dokonania oceny strategii zapewniających funkcjonowanie badanego systemu<sup>10</sup>.

"**Symulacja**" jest czynnością lub metodą znajdowania rozwiązań"<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> W. Flakiewicz „Decyzje kierownicze - teoria i praktyka”

<sup>11</sup> W.Filar „Modelowanie i symulacja komputerowa w procesie dowodzenia”

"**Symulacja** jest techniką eksperymentalną służącą poznawaniu i zrozumieniu praw rządzących zachowaniem się badanego systemu".

"**Symulacja**" to działanie modelu systemu przedmiotowego (rzeczywistego) realizowana w jakimś określonym celu".

Model umożliwiający przeprowadzanie na nim eksperymentów symulacyjnych można określać mianem "**modelu symulacyjnego**".

Modelowanie symulacyjne z wykorzystaniem elektronicznej techniki obliczeniowej wiąże się również z takimi terminami jak "**modelowanie cyfrowe**" (modelowanie komputerowe), a model symulacyjny z określeniem "**komputerowy model symulacyjny**".

"**Komputerowy model symulacyjny**" jest logiczno-matematycznym przedstawieniem pojęcia systemu lub działań zaprogramowanym w celu rozwiązania za pomocą elektronicznej maszyny cyfrowej".

"**Symulacja cyfrowa**" jest techniką algorytmiczną służącą do dokonywania eksperymentów na modelach systemów rzeczywistych w określonym celu za pomocą elektronicznej maszyny cyfrowej"<sup>12</sup>.

### **5.1. Istota modelowania symulacyjnego**

Metoda modelowania symulacyjnego należy do jednej z najbardziej efektywnych metod badania obiektów (systemów) rzeczywistych o dużym stopniu złożoności. Jej istota polega na zbudowaniu modelu badanego obiektu (systemu) i przeprowadzaniu na nim eksperymentów ukierunkowanych na uzyskanie informacji o zachowaniu się obiektu pod wpływem czynników zewnętrznych i wewnętrznych. Mówiąc o metodzie modelowania symulacyjnego, z reguły mamy na myśli metodę zorientowaną na zastosowanie techniki komputerowej, dlatego też w literaturze można spotkać tę metodę pod nazwą metody symulacji komputerowej, metody modelowania dynamicznego, statystycznego itp.

Symulacja jako metoda znajduje coraz większe zastosowanie przy podejmowaniu decyzji, szkoleniu oraz w pracach badawczych. Po raz pierwszy pojęcie symulacji

---

<sup>12</sup> W.Sadowski „Podstawy ogólnej teorii systemów”

systemów znalazło praktyczne zastosowanie na początku lat 50-tych. Stosunkowo najwcześniej symulację komputerową wykorzystano w badaniach o charakterze militarnym. W USA wprowadzono między innymi symulacyjne modele komputerowe systemów obrony powietrznej<sup>13</sup>

Modelowanie symulacyjne stanowi skojarzenie metody matematycznej i eksperymentalnej. Konstruując model opisujemy formalnie mechanizm zachodzących procesów, podobnie jak przy stosowaniu metod matematycznych, natomiast sposób uzyskiwania wyników jest taki jak w metodach eksperymentalnych z tą tylko różnicą, że eksperyment przeprowadzany jest nie na obiekcie (systemie) rzeczywistym lecz na modelu tego obiektu. Zatem metoda ta pozwala:

- opisać funkcjonowanie obiektu (systemu);
- budować teorie i hipotezy, które mogą wyjaśnić obserwowane zachowanie się obiektu (systemu);
- wykorzystać zbudowane teorie i hipotezy do przewidywania przyszłego zachowania się obiektu.

Niewątpliwymi zaletami tej metody są przede wszystkim możliwości:

- badania zachowania się modelu systemu zarówno przy zmianie parametrów systemu jak i jego środowiska,
- uzyskania wielu wariantów rozwiązań,
- badania systemów rzeczywistych oraz hipotetycznych.

Należy zaznaczyć, że eksperymenty symulacyjne są powtarzalne i niedestruktywne.

Niewłaściwe zastosowanie tej metody, błędy na różnych etapach tworzenia modelu symulacyjnego mogą w konsekwencji prowadzić do skromnych rezultatów.

---

<sup>13</sup> tamże

Zastosowanie metody modelowania symulacyjnego w badaniu złożonych systemów wojskowych (w tym również procesów walki) może przynieść znaczne korzyści, gdyż umożliwia:

- naśladowanie (odwzorowanie) procesów walki, procesów zabezpieczenia, zasilania i obsługi wojsk, przy zmieniających się warunkach;
- badanie skutków podejmowanych decyzji w aspekcie organizacyjnym, technicznym, informacyjnym, ekonomicznym i innych;
- odtwarzanie elementów systemu i ich powiązań, występujących w strukturze sił zbrojnych, w celu ich przebadania.

Metoda modelowania symulacyjnego zakłada dokonywanie analizy powiązań i zależności wszystkich elementów i czynników wywierających wpływ na funkcjonowanie systemu jako całości. Pozwala ponadto uwzględniać występowanie losowości i nieokreśloności w badanych systemach, dlatego też może stanowić mocne wsparcie dla intuicji i ocen dokonywanych przez ekspertów i specjalistów wojskowych.

W odróżnieniu od ścisłych metod optymalizacyjnych (w sensie takich metod analitycznych jakie są stosowane np. w badaniach operacyjnych), modelowanie symulacyjne pozwala na uzyskanie rozwiązania nie optymalnego lecz zadowalającego lub wystarczającego.

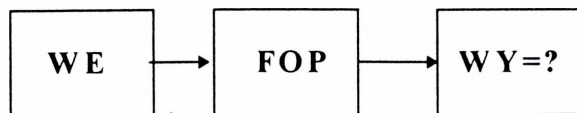
Z przedstawionej istoty modelowania symulacyjnego wynika, że metoda ta obejmuje dwa podstawowe etapy:

- 1) zbudowanie modelu symulacyjnego badanego obiektu (systemu) (ta czynność nazywana jest również modelowaniem);
- 2) eksperymentowanie na zbudowanym modelu ukierunkowane na rozwiązanie określonego problemu (zadania).

Symulacja cyfrowa jest wygodnym narzędziem do rozwiązywania wielu problemów zarówno na etapie projektowania jak i eksploatacji oraz modernizacji systemów rzeczywistych. Stosując ją należy się jednak upewnić czy do rozwiązania danego zagadnienia nie ma innych efektywniejszych metod.

W praktyce stosowania metody modelowania symulacyjnego można spotkać się najczęściej z następującymi typami modeli symulacyjnych:

### A. Model oceny skutków decyzji



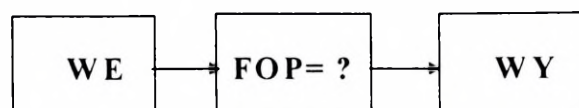
Istotą tego typu modelu jest to, że znany jest stan wejść modelu (WE) oraz formalny opis procesów zachodzących w badanym obiekcie (systemie) (FOP), natomiast nie jest znany stan wyjść modelu (WY). Inaczej mówiąc, chcemy uzyskać informacje o tym, jakie będą skutki podjętej decyzji, przy ustalonym działaniu obiektu (systemu).

### B. Model wspomaganie decydenta

$$\min K = cD + \frac{PD\sqrt{hb}}{\sqrt{2PD}\sqrt{h+b}} - \frac{b^2\sqrt{2PD}\sqrt{h+b}}{2(h+b)\sqrt{hb}} + \frac{h\sqrt{2PD}\sqrt{h+b}}{2\sqrt{hb}}$$

W modelu tym znany jest formalny opis procesów (FOP) zachodzących w badanym obiekcie oraz stan wyjść (WY), natomiast poszukiwany jest stan wejść modelu (WE). Model tego typu może być stosowany w procesie podejmowania decyzji, gdyż pozwala uzyskać odpowiedź na pytanie: jakie dane należy wprowadzić, aby osiągnąć pożądane wyniki?

### C. Model identyfikacji (strukturalnej syntezy) obiektu (systemu)



Model ten charakteryzuje się tym, że znany jest stan wejść (WE) oraz stan wyjść (WY) modelu, natomiast nie jest znany formalny opis funkcjonowania obiektu (systemu). Tego typu model stosowany jest przede wszystkim do poznawania procesów zachodzących w badanym obiekcie (systemie) i dokonywania zmian w jego funkcjonowaniu w celu uczynienia go bardziej efektywnym.

W praktyce stosowane są najczęściej modele symulacyjne będące kombinacją przedstawionych wyżej trzech typów modeli.

## **5.2. Ogólne wskazówki budowy modelu działań bojowych**

W modelowaniu symulacyjnym, które opiera się głównie na analizie systemowej, teorii prawdopodobieństwa i statystyce, dużą rolę odgrywa intuicja. Dlatego też przestrzeganie ścisłych reguł podczas budowy modelu ma ograniczoną użyteczność. Pewne wskazówki dotyczące racjonalnego podejścia powstają drogą usystematyzowania wiedzy opartej na intuicji i doświadczeniu tych, którzy wcześniej zajmowali się budowaniem modeli symulacyjnych. Uzyskane w wyniku takiego postępowania reguły konstruowania modelu stanowią tylko pewną logiczną rekonstrukcję zdarzeń i niewiele mają wspólnego z metodyką modelowania, wypracowaną na podstawie przeprowadzonych badań. W dostępnych materiałach na temat modelowania przedstawiona jest zwykle kolejność zdarzeń i w jaki sposób należy postępować posługując się swoją wiedzą, natomiast brak jest opisów fałszywych dróg, błędów i trudności napotkanych podczas budowy modelu.

Modelowanie symulacyjne jest procesem składającym się z następujących etapów<sup>14</sup>:

1. sformułowanie problemu badawczego,
2. poszukiwanie rozwiązań,
3. budowa modelu,
4. weryfikacja modelu,
5. przeprowadzanie eksperymentów,
6. analiza wyników,
7. dokumentowanie,
8. praktyczne wykorzystanie modelu.

Przystępując do badania symulacyjnego systemu rzeczywistego koniecznym jest sformułowanie problemu badawczego oraz wskazanie celu modelowania. Należy wyraźnie określić granice między systemem badanym, a jego środowiskiem, a także dokonać wyboru parametrów i zmiennych systemu.

---

<sup>14</sup> W.Sadowski „Podstawy ogólnej teorii systemów”

Budowany model może mieć różne przeznaczenie i odpowiadające mu cele. Najczęściej cele te wiążą się z:

- oceną funkcjonowania obiektu (systemu);
- porównywaniem funkcjonowania obiektu (systemu), wyrażającym się w przeciwstawieniu innym obiektom (systemom) realizującym określone funkcje;
- prognozą zachowania się obiektu (systemu) przy założonych warunkach i ograniczeniach;
- analizą reagowania obiektu (systemu), polegającą na ujawnieniu tych czynników oddziałujących na obiekt, które w największym stopniu wywierają wpływ na realizację podstawowych jego funkcji;
- optymalizacją zapewniającą najlepsze funkcjonowanie obiektu (systemu);
- ujawnieniem powiązań funkcjonalnych wyrażających charakter zależności między wybranymi czynnikami lub elementami obiektu (systemu).

W praktyce w zależności od przeznaczenia i konkretnych warunków mogą występować różne kombinacje wyżej wymienionych celów.

Etap poszukiwania rozwiązań polega na zebraniu niezbędnych danych do modelu, ustaleniu powiązań między elementami oraz opracowaniu alternatywnych rozwiązań dla osiągnięcia postawionych celów.

Budowa modelu symulacyjnego odbywa się w warunkach niepełnych informacji i często w warunkach nieokreśloności. Dlatego też przy formułowaniu celów i wyborze kryteriów dla tego rodzaju modeli przeważa koncepcja suboptymalności, co oznacza, że dokonywany jest wybór celów pośrednich oraz kryteriów związanych z rozwiązywaniem problemów logicznie zgodnych i stanowiących pewne przybliżenie do problemów rozwiązywanych na wyższym poziomie. Cele powinny być tak sformułowane, aby zawierały wskazówki do prawidłowego określenia zadań oraz wskazywały kierunki budowy modelu symulacyjnego.

Wybór elementów i ich powiązań, jako części składowych modelu jest czynnością bardzo istotną. W tym przypadku należy uwzględniać tylko takie elementy i ich powiązania, które mają bezpośredni związek z rozpatrywanym problemem. Przy wyborze elementów napotyka się zazwyczaj na dylemat: z jednej strony dąży się do zbudowania

możliwie prostego modelu aby uczynić go przez to bardziej przejrzystym i zrozumiałym, a z drugiej strony pragniemy uzyskać możliwie dokładny model systemu rzeczywistego. Upraszczenie modelu ma taką granicę, aby model nie stał się trywialnym, ale również nie zawierał tyle szczegółów, które nadmiernie by go skomplikowały oraz utrudniały posługiwanie się nim.

Aby nie włączać do modelu elementów, które niewiele wnoszą w rozwiązanie zadania, należy budować model zorientowany na rozwiązanie problemów, a nie imitować system rzeczywisty ze wszystkimi jego szczegółami. Dlatego też model powinien odwzorowywać tylko te elementy systemu, które odpowiadają przeznaczeniu i celom budowanego modelu. Przy wyborze elementów trzeba polegać na zdrowym rozsądku, intuicji, doświadczeniu oraz zdaniu ekspertów lub na danych z analizy statystycznej.

W trakcie budowy modelu bardzo ważne znaczenie ma ustalenie danych wejściowych i wyjściowych, a także charakterystyk ilościowych i jakościowych poszczególnych elementów modelu oraz ich wzajemnych powiązań.

W rozważaniach dotyczących dynamiki podstawowym pojęciem jest "zdarzenie". Zdarzenie definiuje się jako zmianę stanu zachodzącą w wyróżnionej chwili czasu. Odwzorowanie własności dynamicznych wymaga wprowadzenia w modelu niezależnej, odrębnej rachuby czasu (tzw. symulowanego czasu systemowego). Ponadto opis struktury dynamicznej modelowanego systemu (współdziałanie obiektów w czasie) wymaga wprowadzenia mechanizmu koordynacji (program zarządzający). Zadaniem mechanizmu koordynacji jest cykliczne badanie warunków występowania zdarzeń oraz porządkowanie i koordynacja zdarzeń w skali czasu systemowego.

Duża złożoność modeli symulacyjnych zarówno w zakresie struktury statycznej jak i dynamicznej (różnorodność obiektów, skomplikowany przepływ informacji) wymaga właściwego doboru języka symulacyjnego. Przy wyborze języka symulacyjnego należy zwrócić uwagę na sposób odwzorowania upływu czasu w modelu, sposób definiowania obiektów, realizację współbieżności procesów, określanie warunków zachodzenia zdarzeń itp..

Ważną fazą budowy modelu symulacyjnego jest jego weryfikacja. Ocena zasadności modelu polega na sprawdzeniu zachowania się modelu w porównaniu z systemem rzeczywistym. W odniesieniu do modeli systemów wojskowych ocena adekwatności

modelu jest szczególnie trudna i sprowadza się w zasadzie do sprawdzenia realności przyjętych założeń, ograniczeń i uproszczeń. W ramach weryfikacji modelu symulacyjnego można wyodrębnić:

- weryfikację służącą do stwierdzenia, czy model zachowuje się zgodnie z przyjętymi celami i jego przeznaczeniem,
- ocenę adekwatności polegającą na sprawdzeniu zbieżności zachowania się modelu i systemu rzeczywistego,
- analizę problemową sprowadzającą się do interpretacji i oceny wyników eksperymentów.

Aby ocenić poprawność funkcjonowania zbudowanego modelu symulacyjnego dobrze jest odpowiedzieć na następujące pytania:

- czy model w sposób bezpośredni i zrozumiały dla użytkownika odzwierciedla procesy zgodnie z obowiązującymi zasadami;
- czy reakcje na zmiany podstawowych parametrów modelu są logicznie uzasadnione, a uzyskane wyniki zasługują na uwagę i są do przyjęcia przez użytkownika;
- czy model jest przydatny do analizy procesów ?

Zatem w fazie weryfikacji modelu należy wracać do danych wejściowych i parametrów oraz przyjętych ograniczeń i założeń i na tym tle oceniać uzyskane wyniki z eksperymentów symulacyjnych.

Właściwie zaplanowany scenariusz eksperymentu winien zapewnić otrzymanie maksymalnej ilości informacji, które pozwolą sformułować oceny (hipotezy) dotyczące statycznych i dynamicznych właściwości badanego systemu.

### 5.3. Metody modelowania

Cechą charakterystyczną metody modelowania jest odtwarzanie procesu funkcjonowania systemu w czasie, przy czym symulowane są elementarne czynności składające się na ten proces, z zachowaniem ich logicznej struktury i kolejności występowania w czasie. Pozwala to uzyskiwać informacje o stanach procesu w określonych momentach czasu i na tej podstawie oceniać zachowanie się badanego systemu.

Podstawowymi metodami, według których tworzy się modele symulacyjne są:

- metoda stałego kroku
- metoda kolejnych zdarzeń (planowanie zdarzeń, przeglądanie zdarzeń, interakcja procesów).

Zasadniczym elementem różniącym te metody jest reprezentacja i traktowanie czasu.

W metodzie stałego kroku czas symulacyjny przybiera stałe wartości. Wartości czasu zdeterminowane są wielkością przyrostu czasu  $\Delta t$  i nie są zależne od chwil występowania zdarzeń. Przetwarzanie zdarzeń ma charakter przetwarzania grupowego. Zdarzenia występujące w kolejnym kwancie czasu  $\Delta t$  są traktowane tak jak gdyby zaszły one w czasie nieco różnym od czasu ich rzeczywistego wystąpienia. Model tworzony metodą stałego kroku wymaga określenia wielkości przyrostu czasu  $\Delta t$ . Przyjęta wielkość przyrostu czasu może mieć istotny wpływ na przebieg symulacji, a przez to na wartość i poprawność wyników. Przyczyną tego jest sposób rozpatrywania zdarzeń. Wszystkie zdarzenia, które miały miejsce w przedziale czasu  $\Delta t$  są traktowane tak jak gdyby wystąpiły jednocześnie na końcu tego przedziału. Wpływ wielkości przyrostu czasu na poprawność wyników można przyjąć za mało istotny, jeżeli parametry modelu wyrażające wartości czasowe są określone z dokładnością do  $\Delta t$ .

W modelu zorganizowanym według metody kolejnych zdarzeń problem wyboru wielkości przyrostu czasu nie istnieje, dzięki czemu całkowicie unika się błędów związanych ze złym wyborem. W metodzie kolejnych zdarzeń upływ czasu symulacyjnego związany jest z czasem występowania zdarzeń. Zdarzenia tworzą kalendarz zdarzeń. Jeżeli zdarzenie wystąpiło w danej chwili to jest obsługiwane, a czas

symulacyjny przyjmuje wartość czasu związanego z wystąpieniem kolejnego zdarzenia z kalendarza zdarzeń. Kolejne zdarzenie jest obsługiwane, a czas zostaje przesunięty do chwili wystąpienia (nowego) najbliższego zdarzenia zaznaczonego w kalendarzu. Ta metoda organizacji modelu wymaga prowadzenia kalendarza zdarzeń (wykreślanie zdarzeń obsługiwanych, wprowadzanie zdarzeń, które dopiero będą miały miejsce). Przy dużej liczbie zdarzeń metoda ta może okazać się czasochłonna. Ponadto przy obsłudze dużej liczby zdarzeń może okazać się, że przedział czasu pomiędzy kolejnymi zdarzeniami jest rzędu  $\Delta t$ , a wtedy korzystniejszą może okazać się metoda stałego kroku.

#### **5.4.. Wnioski natury metodologicznej**

- A. Pomyślna realizacja prac związanych z budową modelu symulacyjnego zależy od uwzględnienia w modelu podstawowych elementów decydujących o przebiegu procesów zachodzących w systemie rzeczywistym. Wskazane jest, aby konstruowanie modelu rozpoczynać od modelu prostego, następnie dobudowywać do niego nowe elementy i w ten sposób przechodzić do coraz dokładniejszego odwzorowywania złożonych procesów walki. Technika modelowania polega bowiem na umiejętności analize problemu, wyodrębnieniu w nim drogą abstrakcji istotnych cech i właściwości dokonywaniu wyboru i włączaniu do modelu odpowiednich elementów oraz modyfikowaniu podstawowych założeń i przyjętych rozwiązań.
- B. Z doświadczeń modelowania wynika, że należy budować model zorientowany na rozwiązywanie problemów i uzyskanie odpowiedzi na sformułowane pytania, a nie symulować procesy ze wszystkimi szczegółami.
- C. W procesie konstruowania modelu symulacyjnego dokonuje się dekompozycji systemu rzeczywistego wyodrębniając w nim poszczególne elementy. Do modelu włącza się tylko te elementy, które są istotne z punktu widzenia celu i przeznaczenia. W ten sposób dochodzi do uproszczenia modelu i to jest jedną z cech dokonywanej analizy. Inną cechą jest abstrakcja, która polega na tym, że istotne cechy i właściwości systemu modelowanego przenosi się do modelu niekoniecznie w takiej postaci, jak to ma miejsce w oryginale. Fakt ten nie

powinien mieć wpływ na użyteczność modelu, pod warunkiem, że model zbudowany jest zgodnie ze ściśle określonymi celami.

- D. W procesie budowy modelu symulacyjnego decydującą rolę odgrywają oceny ekspertów oraz inicjatywa i pomysłowość ze strony projektantów. Ocena ekspertów powinna przenikać wszystkie etapy modelowania oraz umożliwić wybór najskuteczniejszego sposobu rozwiązania problemu.
- E. W określeniu stopnia adekwatności modelu w porównaniu z sytemem rzeczywistym występują spore trudności. Można to określić tylko częściowo, drogą analizy reakcji modelu na zmiany określonych parametrów oraz drogą oceny wyników eksperymentu symulacyjnego przez zespół ekspertów. Nie ulega wątpliwości, że stopień ten zależy od tego, na ile poprawnie przeprowadzona została analiza problemu, uproszczenia i synteza procesów zachodzących na polu walki.
- F. Sztuka modelowania między innymi polega na stałym doskonaleniu modelu i doprowadzaniu go do stanu pozwalającego zaspokoić stale wzrastające wymagania użytkownika.
- G. Powodzenie budowy modelu symulacyjnego zależy nie tylko od możliwości współczesnych komputerów, ale przede wszystkim od ich efektywnego wykorzystania.

Reasumując można stwierdzić, że:

- A. Celem modelowania nie jest modelowanie same w sobie, lecz osiągnięcie określonych celów poznawczych (badawczych) i praktycznych.
- B. Modelowanie jest formą „walki” ze złożonością rzeczywistości, z jego nieokreślonością;
- C. Celem modelowania jest uzyskanie nowych informacji o rzeczywistości.
- D. Modelowanie jest:
- tworzeniem modelu, czyli obrazu określonego fragmentu rzeczywistości (w wąskim sensie);

- tworzeniem modelu oraz eksperymentowaniem w celu uzyskania nowych informacji o rzeczywistości (w szerokim sensie).
- E. Tworzenie modelu to tyle co odwzorowanie „oryginału” w jego „obraz”, czyli określona relacja między oryginałem a obrazem;
- F. Modelowanie jest procesem interakcyjnym, czyli obejmuje szereg etapów (cykli) z możliwością do powrotu do cykli wcześniejszych;
- G. Tworzenie modelu zawsze poprzedza konceptualizacja, czyli czynności myślenia twórczego, dla których istotne znaczenie mają **wiedza, intuicja i wyobraźnia ludzka**.

### **5.5. Przykład modelu symulacyjnego**

Za przykład modelu symulacyjnego może służyć model symulacji działań bojowych szczebla taktyczno-operacyjnego MODEL-5 opracowany przez zespół Centrum Informatyki AON.

#### **A. WYMAGANIA:**

- źródłem danych dla systemu powinna być baza danych o wojskach eksploatowana w wojsku MIKROOS;
- prosty sposób komunikacji z systemem;
- krótki czas trwania obliczeń;
- eksploatowany na komputerach PC.

#### **B. ZAŁOŻENIA I OGRANICZENIA**

- walka zbrojna jest prowadzona środkami konwencjonalnymi;
- w procesie walki biorą udział jednostki ogólnowojskowe i artylerii wspierane uderzeniami samolotów i śmigłowców;
- możliwości jednostki określa jej potencjał bojowy;
- rodzaje działań bojowych ograniczono do:
  - obrony, natarcia, pościgu, boju spotkaniowego, działań opóźniających, marszu, artyleria na stanowiskach ogniowych i rejonu ześrodkowania;
- bezpośredniego udziału w walce nie biorą elementy ugrupowania znajdujące się w marszu i w rejonie ześrodkowania;

- z jednostek tworzone są ugrupowania bojowe stron;
- jedno ugrupowanie prowadzi walkę z jednym ugrupowaniem strony przeciwnej;
- w wyniku walki jednostki wchodzące w skład ugrupowań ponoszą straty oraz może nastąpić przesunięcie linii styczności;
- celem uderzeń samolotów i śmigłowców są wskazane obiekty (jednostki) ugrupowania strony przeciwnej;
- wpływ otoczenia ograniczono do elementów rzeźby i pokrycia terenu oraz warunków meteorologicznych;
- obliczenia są prowadzone w czasie operacyjnym w określonych przez operatora cyklach o czasie trwania 15, 30 lub 60 min i ich wielokrotność;
- po każdym cyklu możliwe jest wprowadzenie decyzji wynikających z przyjętego planu działania wojsk;
- w modelu nie rozpatruje się procesów dowodzenia, zasilania i zabezpieczenia bojowego działań.

### **C. REALIZOWANE ZADANIA PRZEZ MODEL:**

- tworzenie dowolnych ugrupowań stron;
- przeglądanie struktur i stanów etatowych;
- porównanie jakościowe i ilościowe stron, ugrupowań i jednostek;
- realizacja wybranych elementów procesu decyzyjnego poprzez określenie:
  - ◆ rodzaju działań i miejsca w ugrupowaniu bojowym;
  - ◆ manewru ogniem artylerii;
  - ◆ planu uderzeń samolotów i śmigłowców;
  - ◆ zmiany rodzaju działań podczas symulacji;
  - ◆ przegrupowanie sił;
  - ◆ czas trwania walki;
- określanie warunków pola walki;
- symulacja walki z uwzględnieniem jej losowego charakteru;
- przedstawianie wyników z przebiegu symulacji.

### **D. OPIS MATEMATYCZNY MODELU:**

Model można opisać następującą „trójką”:

$$\mathbf{M} = \{ \mathbf{E}, \mathbf{O}, \mathbf{R} \}$$

Gdzie:

$\mathbf{E}$  - zbiór elementów - obiektów uczestniczących w walce,

$\mathbf{O}$  - zbiór czynników otoczenia (środowiska walki) wpływających na elementy walki,

$\mathbf{R}$  - zbiór relacji zachodzących między elementami wzajemnie oraz otoczeniem:

$$\mathbf{R} \subset \mathbf{E} \times \mathbf{E} \times \mathbf{O}$$

Przy założeniu, że elementy zbioru spełniają następujące warunki:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^{\mathbf{A}} \cup \mathbf{E}^{\mathbf{B}}$$

$$\mathbf{E}^{\mathbf{A}} \cap \mathbf{E}^{\mathbf{B}} = \emptyset$$

$$\mathbf{E}^{\mathbf{A}} \neq \emptyset ; \mathbf{E}^{\mathbf{B}} \neq \emptyset$$

gdzie:

$\mathbf{E}^{\mathbf{A}}$  - zbiór elementów (obiektów) strony A,

$\mathbf{E}^{\mathbf{B}}$  - zbiór elementów (obiektów) strony B,

Każdy element  $e \in \mathbf{E}$  można opisać pewną skończoną liczbą zmiennych, atrybutów, które można podzielić na:

- identyfikacyjne, które jednoznacznie identyfikują obiekt w systemie. Są stałe nie mają wpływu na przebieg walki;
- decyzyjne (operacyjne), które odwzorowują sposób prowadzenia działań przez element (wynikają z podejmowanych decyzji). Są zmienne wynikają ze scenariusza walki. Mają wpływ na przebieg walki.
- stanu określają potencjalne możliwości elementu w systemie (podczas walki). Są zmienne. Wynikają z etatowego wyposażenia elementu w sprzęt bojowy i jego parametrów oraz aktualnego procentu ukończenia.

Potencjalne możliwości i-tego elementu są określane wielkością potencjału bojowego, który wyraża się następującą zależnością:

$$p_i = \sum_{j=1}^N n_j \cdot k_j$$

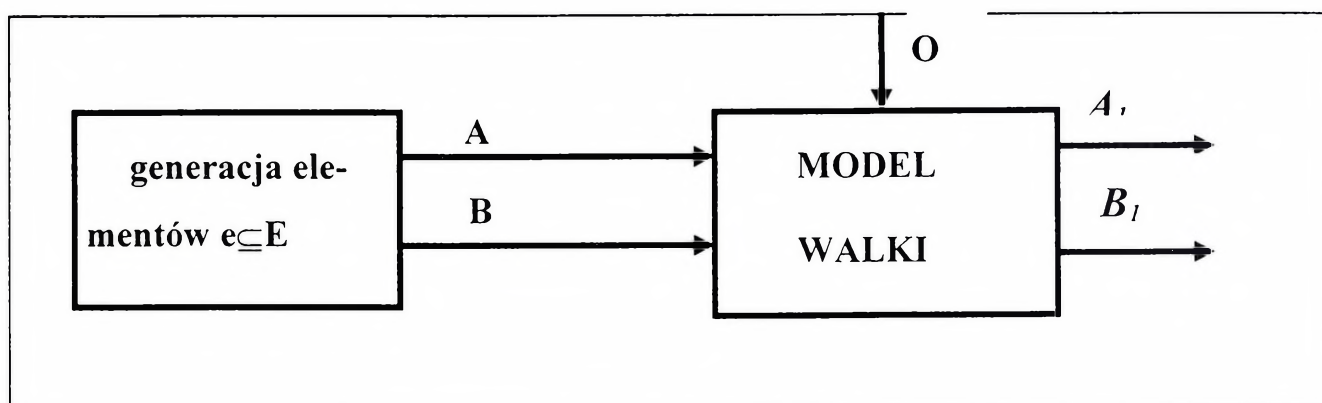
gdzie:  $p_i$  to potencjał bojowy elementu;

$N$  - ilość typów sprzętu bojowego elementu;

$n_j$  - ilość sprzętu bojowego j-tego typu;

$k_j$  - wskaźnik jakościowy j-tego typu sprzętu.

Jeśli przyjmiemy, że przez  $A$  oznaczmy podzbiór elementów  $E^A$  wyznaczonych do walki ze strony A, a przez  $B$  analogicznie podzbiór elementów  $E^B$  wyznaczonych do walki ze strony B, to system walki można przedstawić w następujący sposób:



Przez  $A_t$  i  $B_t$  oznaczamy podzbiory elementów stron uczestniczące w walce po czasie  $t$ . Stan potencjałów bojowych elementów po tym czasie ulega zmianie (jest pomniejszony przez poniesione straty). Do wyliczenia strat w modelu walki został przyjęty model **Lanchestera**, którego klasyczna postać jest następująca:

$$\frac{dm^A}{dt} = -\Lambda^B \cdot m^B$$

$$\frac{dm^B}{dt} = -\Lambda^A \cdot m^A$$

gdzie:  $m^A$  liczba środków strony A,

$m^B$  liczba środków strony B,

$\Lambda$  oznacza strumień skuteczności strzelania strony A i B wyrażony wzorem:

$$\Lambda^A = \lambda^A * \mu^A$$

gdzie:

$\lambda^A$  - szybkostrzelność środków strony A,

$\mu^A$  - prawdopodobieństwo trafienia środków przeciwnika przez środki strony A,

$\lambda^B$  - szybkostrzelność środków strony B,

$\mu^B$  - prawdopodobieństwo trafienia środków przeciwnika przez środki strony B,

przy założeniu, że strony (każda może mieć inne) są wyposażone w jednorodne środki.

Stąd w czasie  $\Delta t$  strona A odda  $m^A * \Lambda^A * \Delta t$  skutecznych strzałów, a strona B  $m^B * \Lambda^B * \Delta t$

Straty poniesione przez strony:

$$\Delta m^A = m^B * \Lambda^B * \Delta t$$

$$\Delta m^B = m^A * \Lambda^A * \Delta t$$

Stąd dzieląc obie strony równań przez  $\Delta t$  i przechodząc do granicy  $\Delta t \rightarrow 0$  otrzymujemy podaną wyżej postać równań w modelu Lanchestera.

Dla współczesnych warunków, przy dużej różnorodności wyposażenia wojsk symulacja w oparciu o klasyczny model Lanchestera jest wymaga odpowiedniej mocy obliczeniowej komputera, komputerowej mapy terenu, a także śledzenie położenia każdego środka walki, jego widoczności i wielu innych elementów. Dlatego też w

proponowanym modelu walki wprowadzamy silne ograniczenia oraz modyfikacje modelu Lanchestera, które pozwolą na jego realizację na komputerze PC.

Wprowadzając pojęcie potencjału stron  $P^A$  i  $P^B$ , intensywność niszczenia potencjału  $In^A$  i  $In^B$ , oraz prawdopodobieństwo wzajemnego rozpoznania stron  $Sr^A$  i  $Sr^B$  otrzymujemy nowy układ równań:

$$\frac{dP^A}{dt} = -\Lambda^B \cdot P^B$$

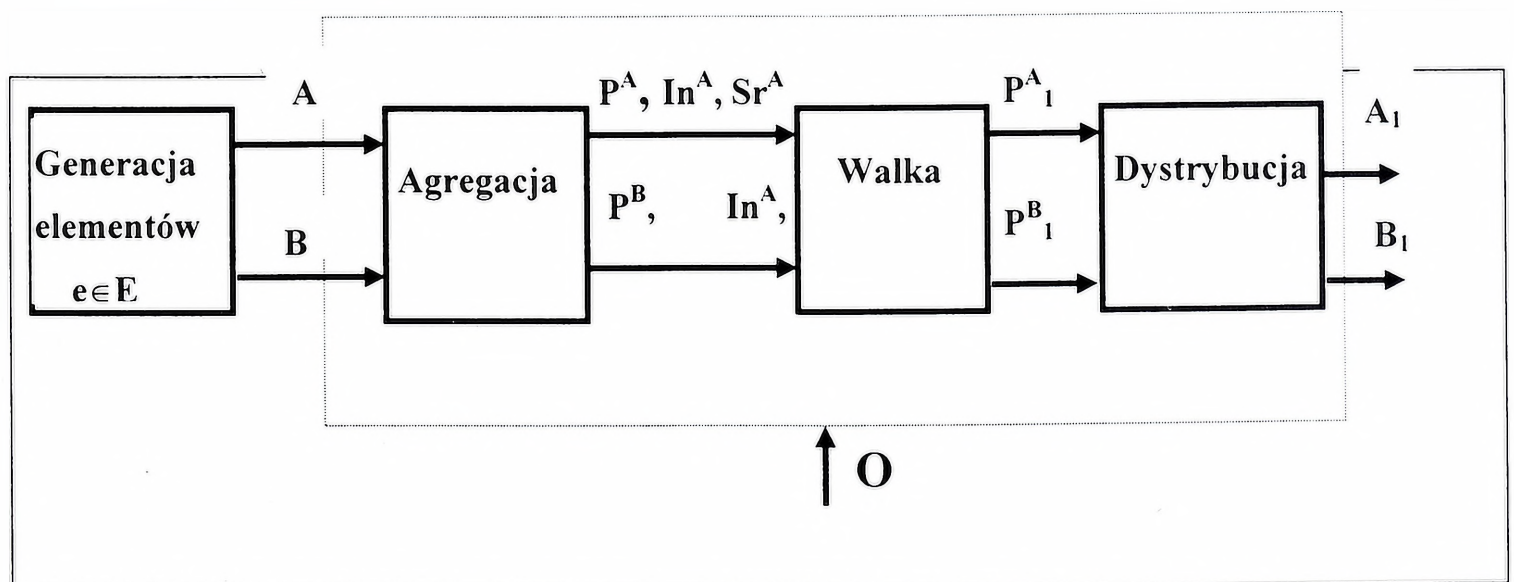
$$\frac{dP^B}{dt} = -\Lambda^A \cdot P^A$$

gdzie:

$$\Lambda^A = In^A * Sr^A$$

$$\Lambda^B = In^B * Sr^B$$

Model można teraz przedstawić w następujący sposób:



W module „Agregacja” następuje agregowanie wartości potencjałów, intensywności niszczenia oraz prawdopodobieństwa rozpoznania poszczególnych elementów wchodzących w skład obu stron. Na wyjściu modułu otrzymujemy:

- ♦ wartość potencjału strony A:

$$P^A = \sum_{i=1}^{L^A} p_i$$

- ♦ wartość intensywności strony A:

$$In^A = \frac{\sum_{i=1}^{L^A} in_i \cdot p_i}{P^A}$$

- ♦ wartość prawdopodobieństwa rozpoznania strony A:

$$Sr^A = \frac{\sum_{i=1}^{L^A} sr_i \cdot p_i}{P^A}$$

gdzie:

$p_i$  - wartość potencjału i-tego elementu;

$in_i$  - wartość intensywności niszczenia i-tego elementu;

$sr_i$  - wartość prawdopodobieństwa rozpoznania i-tego elementu;

$L^A$  - ilość elementów strony A;

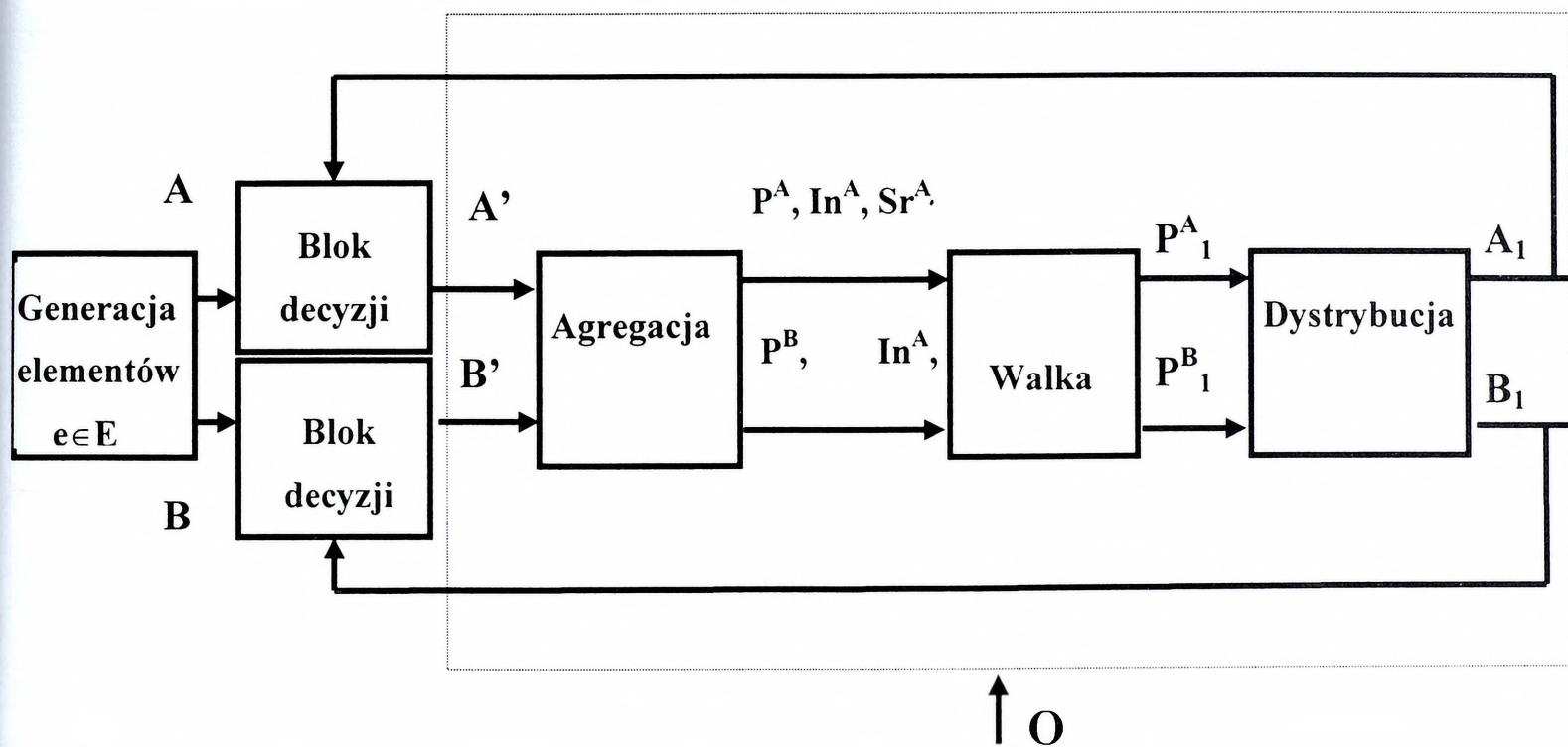
Sposób agregacji dla obu stron jest identyczny.

W module walka następuje wyliczenie strat obu stron w walce w czasie  $\Delta t$ .

W module dystrybucja następuje rozdzielnie strat stron na poszczególne elementy.  
Zasadą dystrybucji może być :

- równomierne rozdzielnie strat na wszystkie elementy;
- losowe rozdzielnie strat.

Jeśli przyjmujemy, że będziemy modelowali podejmowanie decyzji podczas walki, w wyniku których elementy mogą wchodzić i wychodzić z walki wówczas model przyjmuje następującą postać:



Przedstawiony powyżej opis modelu symulacji działań bojowych stanowi jeden z możliwych przykładów formalnego opisu tego procesu.

## BIBLIOGRAFIA DO ROZDZIAŁU 5

1. Dupuy T., N. – *Liczby, prognozy i wojna. Cz.1. Ilościowo – jakościowa metoda oceny zdolności bojowej i prognoz wyników walki*. Instytut Badań Strategiczno – Obronnych ASG WP, Warszawa 1984 (tłumaczenie z angielskiego).
2. Flanek Cz., Ficoń K. – *Symulacyjny model potencjału obronnego państw sąsiadujących z Polską, cz.1 – Analiza operacyjna potencjału wojennomorskiego państw bałtyckich*, praca n-b „Symulacja”, Centrum Informatyki AON 1998.
3. Flanek Cz., Ficoń K. – *Symulacyjny model potencjału obronnego państw sąsiadujących z Polską, cz.2 – Analiza potencjału obronnego lądowych sąsiadów Polski*, praca n-b „Symulacja”, Centrum Informatyki AON 1999.
4. Gogolewski J., Ratajczak M., Wieleba R., Wocial J. – *Koncepcja modelu symulacyjnego systemu obronnego państwa*, praca n-b „Opcja”, Departament Systemu Obronnego MON, Warszawa 1993.
5. Gogolewski J., Ratajczak M., Wieleba R., Wocial J. – *Strukturalny model systemu państwa i systemu obronnego państwa*, praca n-b „Opcja”, Departament Systemu Obronnego MON, Warszawa 1994.
6. Gutenbaum J. – *Modelowanie matematyczne systemów*, PWN, Warszawa – Łódź 1987.
7. Kilar E., Kinasiewicz M., Urbanek M. – *Modelowanie operacji wojsk lądowych*, ASG, Warszawa 1990.
8. Kulczycki R. – *System modelowania walki zbrojnej*, sprawozdanie z pracy n-b „Model-1” Instytut Badań Strategiczno - Obronnych ASG, Warszawa 1988.
9. Kulczycki R., Gogolewski J., Ratajczak M., Wieleba R., Wocial J. – *Model walki zbrojnej szczebla operacyjno - strategicznego „SKORPION”*, praca n-b „Sieć”, AON, Warszawa 1995.
10. Kulczycki R., Gogolewski J., Ratajczak M., Wieleba R., Wocial J. – *Model walki zbrojnej szczebla strategicznego „MODEL WOJNY”*, praca n-b „Sieć-1”, AON, Warszawa 1997.
11. Ratajczak M., Wieleba R., Mrowiec T. – *Prognozowanie skutków decyzji podejmowanych w działaniach bojowych z zastosowaniem metody modelowania symulacyjnego*, rozprawa doktorska, AON, Warszawa 1991.
12. Sienkiewicz P. – *Inżynieria systemów. Wybrane zastosowania wojskowe*, MON, Warszawa 1983.
13. Sienkiewicz P. – *Inżynieria systemów kierowania*. PWE, Warszawa 1988.
14. Sienkiewicz P. – *Analiza systemowa. Podstawy i zastosowania*, Bellona, Warszawa 1994.
15. Urbanek M. – *Model symulacyjny zabezpieczenia leczniczo – ewakuacyjnego działań bojowych wojsk na szczeblu taktycznym*, rozprawa doktorska, AON, Warszawa 1992.
16. Wocial J. – *Potencjał rażenia sił zbrojnych Polski i państw otoczenia*, praca n-b „Gamma”, AON, Warszawa 1994.
17. Wocial J. – *Metoda oceny wartości modeli systemu sił zbrojnych* – rozprawa doktorska, AON, Warszawa 1998.
18. Zeigler B. P. – *Teoria modelowania i symulacji*, PWN, Warszawa 1984.

## 6. MODELE EKSPERTOWE

Podstawową metodą informatycznego rozwiązywania danego problemu jest zbudowanie dla niego modelu<sup>15</sup>. Analizując reprezentację cech problemu i metod używanych do jego rozwiązania, budowane modele można podzielić na:

- obliczeniowe,
- morfologiczne,
- semantyczne.

Model obliczeniowy powstaje wtedy, gdy interesujące cechy problemu wyraża się w postaci wielkości przyjmujących wartości liczbowe. Związki między tymi wielkościami można z dostateczną dokładnością aproksymować zależnościami matematycznymi. Zależności te posiadają realizacje w postaci efektywnych algorytmów działań na wartościach liczbowych. Typowymi przykładami prostych modeli obliczeniowych są układy równań i nierówności algebraicznych, układy równań różniczkowych i całkowych, zależności statystyczne, algebraiczne i analityczne.

W modelach obliczeniowych dominującym aspektem są wartości obiektów i operacje wykonywane na tych wartościach, zgodnie z regułami wywodzącymi się z zależności o naturze matematycznej.

W modelach morfologicznych interesujemy się przede wszystkim wzajemnymi powiązaniem między obiektami, zwłaszcza zaś sposobem w jaki obiekty proste łączą się ze sobą tworząc obiekty złożone, a także cechami wspólnymi agregacji obiektów złożonych. Podstawowymi operacjami występującymi w modelach morfologicznych są operacje odwzorowujące działania na obiektach: porządkowania zgodnie z zadanymi kryteriami, grupowania obiektów (w tym podział zbioru obiektów na klasy abstrakcji) oraz wyszukiwanie obiektów o określonych cechach morfologicznych. Działania na wartościach, będących własnościami obiektów, są w modelach morfologicznych zazwyczaj bardzo proste, z reguły nie wykraczają poza działania arytmetyczne i porównania. Dziedzinami odgrywającymi rolę wiodącą w modelach morfologicznych są: teoria zbiorów, kombinatoryka, teoria grafów, przetwarzanie tekstów i wyszukiwanie informacji. Typowym przykładem algorytmicznej realizacji modelu morfologicznego są bazy danych.

---

<sup>15</sup> Turski W.M.: Propedeutyka informatyki. PWN, Warszawa 1988

Elementami modelu semantycznego są nie tyle wartości liczbowe (jak w modelach obliczeniowych) czy fragmenty strukturalne (jak w modelach morfologicznych) lecz pojęcia. Związki między pojęciami są analogiami związków semantycznych czyli wnioskowań. W sformalizowanych teoriach można niekiedy zastąpić pojęcia i wnioskowanie liczbami i regułami arytmetycznymi, jednak w wielu przypadkach tak dalece posunięta formalizacja jest niezmiernie trudna a czasem niewykonalna. Przykładem modeli semantycznych są systemy: analizy semantycznej, systemy ekspertowe, rozpoznawania postaci.

### **6.1. Istota modelu ekspertowego**

System ekspertowy jest systemem informatycznym, wykorzystującym zapisaną wiedzę eksperta do rozwiązywania problemów, które normalnie wymagają ludzkiej inteligencji<sup>16</sup>. System ekspertowy symuluje działanie eksperta w sposobie użytkownika - poprzez analizę odpowiedzi użytkownika na pytania kierowane do niego przez system. Kryteria wyróżniające systemy ekspertowe (SE) na tle klasycznego oprogramowania są następujące:

1. System ekspertowy (SE) jest programem komputerowym, zaprojektowanym do współpracy ze specjalistą (człowiekiem) w ograniczonej, lecz trudnej dziedzinie praktycznej. Zadania dla systemu ekspertowego oprócz typowych obliczeń powinny wymagać wnioskowania. Dziedzina powinna być trudna w tym sensie, że stawiane w niej problemy rozwiązywane są przez wykształconych i doświadczonych specjalistów, nie zaś na drodze zdrowego rozsądku. Przeznaczeniem SE nie jest zastępowanie specjalistów - efektem interakcji z większością poważnych SE jest zwiększenie poziomu i dokładności ekspertyzy oraz standaryzacja raportów, będących efektem działania SE.

2. Wnioskowanie SE modeluje się na podstawie rozumowań specjalistów - ludzi. Kryterium to wyłącza np. programy opierające się na statystyce.

3. System ekspertowy oprócz reprezentacji wiedzy z dziedziny której dotyczy, powinien dysponować przynajmniej częściową reprezentacją wiedzy o samym sobie. Zwykle programy produkują wyniki, lecz nie przechowują danych o tym, co i dlaczego zrobiły, a więc nie są w stanie później swego zachowania wyjaśnić aktywnie (chodzi o możliwość interakcyjnego dociekania szczegółów zachowania się programu). W czasie

interakcji ze specjalistą możliwe są też modyfikacje systemu, co nie wchodzi w rachubę w zwykłych programach.

4. Interfejs SE budowany jest z wykorzystaniem podzbiorów języka naturalnego i z użyciem grafiki komputerowej. Pozwala to na bezpośrednią współpracę ludzi z systemem, bez pośrednictwa specjalizowanych języków czy konwencji specyfikacji danych.

Moc programu ekspertowego w zakresie rozwiązywania danego problemu tkwi w zakodowanej w nim wiedzy, a nie w formalizmie i schematach wnioskowania, których ten program używa. Można to wyrazić w postaci stwierdzenia: im pełniejsza wiedza, tym szybciej uzyskuje się rozwiązanie. Tak więc problem z posiadaniem pełnej wiedzy tkwi w bazie wiedzy, a nie w sposobie realizacji procesu wnioskowania systemu ekspertowego. Oznacza to, że aby zbudować inteligentny program, należy go wyposażać w dużą ilość dobrej jakości, specyficznej wiedzy o danym przedmiocie.

O każdym użytecznym programie komputerowym można powiedzieć, że wykorzystuje wiedzę. Zazwyczaj wiedza ta wyrażona jest w postaci algorytmicznej - została użyta jednokrotnie do skonstruowania algorytmu, który odtąd ją reprezentuje. Twórcy algorytmów są w stanie zawczasu przewidzieć, co i w jakiej kolejności powinno być robione z danymi dla osiągnięcia zamierzonej relacji między danymi wejściowymi a wynikami działania programu.

Istnieje jednak pewna asymetria: o ile na przykład obliczenia numeryczne, w których potęga komputerów jest szczególnie widoczna, mogą w zasadzie być wykonane przez człowieka „ręcznie”, o tyle istnieje szeroka klasa zadań wykonywanych przez ludzi, które opierają się komputeryzacji. Zwykle o tych zadaniach mówi się, że wymagają inteligencji. Na tle innych zadań wyróżniają się tym, że zarówno w samych ich sformułowaniach, jak i w danych występuje ogromna różnorodność. Dane dotyczą pojęć, wchodzących między sobą w liczne związki znaczeniowe. Związki te muszą być odzwierciedlone w programie, by mógł on adekwatnie interpretować przetwarzane informacje. Tu czysta metoda algorytmiczna osiąga barierę złożoności. Jej środki formalne są zbyt ubogie do reprezentacji znaczeń danych.

Cechą charakterystyczną systemów ekspertowych jest to, że posługują się one wiedzą reprezentowaną jawnie. W systemie ekspertowym rozdziela się składnik wiedzy od części algorytmicznej. Odium rozwiązywania problemów spada na wyodrębniony

---

<sup>16</sup> Mulawka J.J.: Systemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1997

składnik wiedzy; algorytm systemu nie rozwiązuje problemów bezpośrednio, zajmuje się tylko stosowaniem sformalizowanej wiedzy. Bariera złożoności jest pokonywana dzięki temu, że stosowanie wiedzy daje się wyrazić algorytmicznie, różnorodność zaś związana z dziedziną problemu znajduje odbicie w treści elementów bazy wiedzy.

Postęp wnoszony przez technologię systemów ekspertowych do automatycznego przetwarzania informacji możemy określić jako stworzenie ponad-algorytmicznych języków programowania - języków kolejnego, wyższego poziomu.

Zapis informacji o wybranej dziedzinie wiedzy w formalnym języku systemu ekspertowego jest podobny do programowania. Język reprezentacji wiedzy pozwala na posługiwanie się pojęciami, które lepiej niż struktury danych i instrukcje języków programowania przystają do zdroworozsądkowych intuicji. Osoby współpracujące przy budowie baz wiedzy (eksperci) najczęściej nie są informatykami. Ponadto, w odróżnieniu od programowania algorytmicznego, w bazie wiedzy najczęściej abstrahuje się od zagadnień sterowania (od konieczności obliczeń). Ważne jest, by wyczerpująco opisać dziedzinę i problem, a mechanizm wnioskujący odpowiedzialny jest za to, by odpowiednie fragmenty wiedzy zostały wyszukane w bazie kiedy trzeba i automatycznie zastosowane tam, gdzie potrzeba. Oznacza to, że w zasadzie opisuje się fakty z dziedziny wiedzy a nie sposoby rozwiązania problemu. Jednak w praktyce wszelkie informacje mające znaczenie dla sterowania - wiedza strategiczna - są niezwykle cenne.

Rozdzielenie w systemach ekspertowych jawnej bazy wiedzy od części algorytmicznej ma szereg zalet. Największą stanowi duża komunikatywność tego medium. Języki reprezentacji wiedzy posługują się zwrotami języka naturalnego, a sama forma zapisu wiedzy opiera się na wariantach notacji logicznej. Bazy wiedzy powinny być zrozumiałe zarówno dla ludzi, jak i dla programów komputerowych. Różnice rozumienia zawartości bazy wiedzy przez ludzi i program komputerowy tworzy następującą iluzję: regule przypisujemy znaczenie ponieważ - jako ludzie - znamy znaczenia występujących w regule terminów. Należy jednak stale pamiętać, że z punktu widzenia programu komputerowego liczy się tylko instancja (wartościowanie) reguły i sama reguła:

„*Jeżeli padało i temperatura jest dodatnia , to jest mokro*” może wyglądać

$$F_{31}(a,b) \Rightarrow F_{467}(c)$$

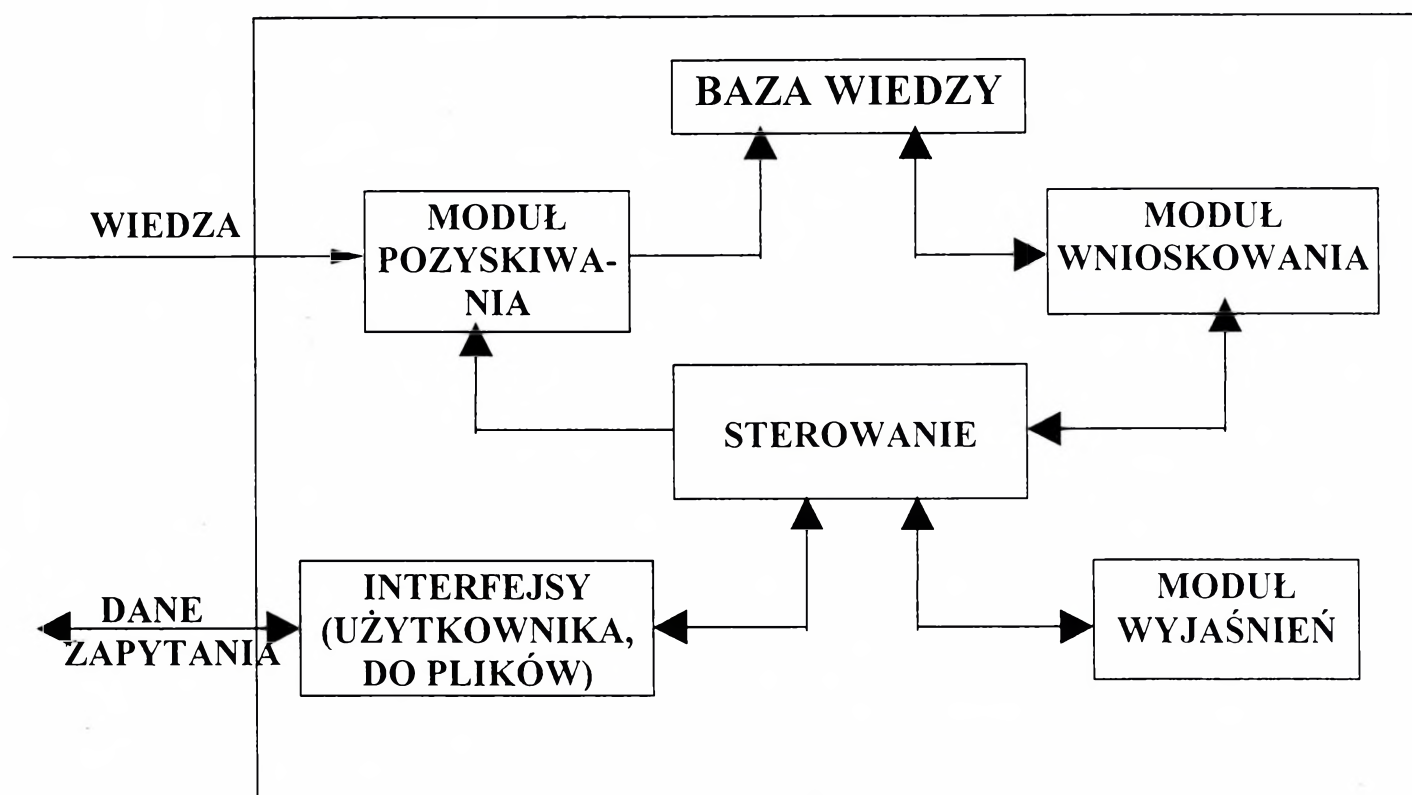
Elementy bazy wiedzy są ze sobą powiązane. Wiedza nie stanowi niczego ponad sam zbiór powiązań. Tylko powiązania między pojęciami stanowią o ich znaczeniu w systemie z bazą wiedzy. Ludzie znając treść (wartościowanie) używanych pojęć, mogą

stwierdzić, czy dana reguła ma sens. Punkt widzenia programu jest dokładnie przeciwny. Program musi przyjąć, że dostarczone reguły mają sens i to jedynie one budują sens używanych pojęć. Im więcej reguł, tym pojęcia stają się wyraźniejsze. Intencją przyświecającą budowie bazy wiedzy jest to, by mimo różniącej się interpretacji przez ludzi i programy, wspólne było to, co składa się na ekspertyzę w danej dziedzinie.

Wydzielenie wiedzy w formie osobnego zapisu pozwala abstrahować od sposobu jej użycia i wykorzystywać to praktycznie. W szczególności, ponieważ zapis wiedzy czytelny jest dla komputera, możliwe jest zastosowanie programów wspomagających tworzenie bazy wiedzy. Typowe jest wykorzystanie interakcyjnej grafiki komputerowej do przedstawiania elementów bazy wiedzy w postaci np. grafu.

Inną konsekwencją wyodrębnienia bazy wiedzy, charakterystyczną dla technologii systemów ekspertowych, jest możliwość użycia jej elementów do wyjaśniania użytkownikom procesów wnioskowania i ich wyników. W praktyce sprowadza się to najczęściej do cytowania użytych reguł, niekiedy przekształcanych w wypowiedzi w języku naturalnym. Wyjaśnianie wnioskowania poprzez cytowanie reguł nie zawsze jest jednak wystarczające. Zastosowanie reguł do nauczania, przy braku głębszej wiedzy o dziedzinie zastosowania jest problematyczne.

Typową architekturę SE przedstawiono na rysunku 6-1:



Rys. 6-1. Architektura systemu ekspertowego

W dotychczasowym rozwoju badań w zakresie sztucznej inteligencji można wyodrębnić dwa podstawowe nurty:

- symboliczny, związany z reprezentacją wiedzy za pomocą symboli,
- konekcjonizm, związany z badaniami w zakresie sieci neuronowych.

Często te dwa podejścia są przeciwstawiane sobie i zależnie od zainteresowań autorów publikacji jedno z nich jest przedstawiane jako lepsze lub gorsze. Autor niniejszego opracowania traktuje oba podejścia jako komplementarne (przynajmniej na obecnym etapie rozwoju obu technologii), jako że każde z nich ma słabe i mocne strony.

Systemy ekspertowe mogą być tworzone z wykorzystaniem różnych narzędzi programowych, ogólnie jednak można podzielić na dwie grupy:

- mniej lub bardziej typowe języki programowania,
- szkieletowe systemy ekspertowe (ang. expert system shells lub skeletal systems).

Opracowanie systemu ekspertowego, przy zastosowaniu pierwszego podejścia, jest zadaniem bardzo pracochłonnym i wymaga zatrudnienia programistów o wysokich kwalifikacjach. Jest to zatem podejście kosztowne, choć elastyczne. Alternatywą jest zastosowanie systemu szkieletowego, zawierającego gotowy podsystem przetwarzania wiedzy. W takim przypadku zadanie twórcy systemu polega głównie na pozyskaniu i sformalizowaniu wiedzy eksperckiej, co samo w jest zadaniem niełatwym.

Przykładem komercyjnej realizacji szkieletowego systemu ekspertowego może być pakiet SPHINX firmy AITECH. Pakiet został uhonorowany nagrodą II stopnia podczas XI Międzynarodowych Targów Oprogramowania SOFTARG '97.

Pakiet SPHINX stanowi nowoczesne środowisko tworzenia, rozwoju i uruchamiania aplikacji, wykorzystujących mechanizmy sztucznej inteligencji. Pozwala na generowanie systemów ekspertowych oraz sieci neuronowych mogących, podczas rozwiązywania złożonych problemów, wzajemnie się uzupełniać. Jako produkt szkieletowy, niezależny dziedzinowo, nadaje się doskonale do wykorzystania w bardzo wielu obszarach zastosowań. W skład pakietu wchodzi:

- szkieletowy system ekspertowy PC-SHELL,
- komputerowy system wspomaganie inżynierii wiedzy CAKE,

- symulator sieci neuronowych NEURONIX .

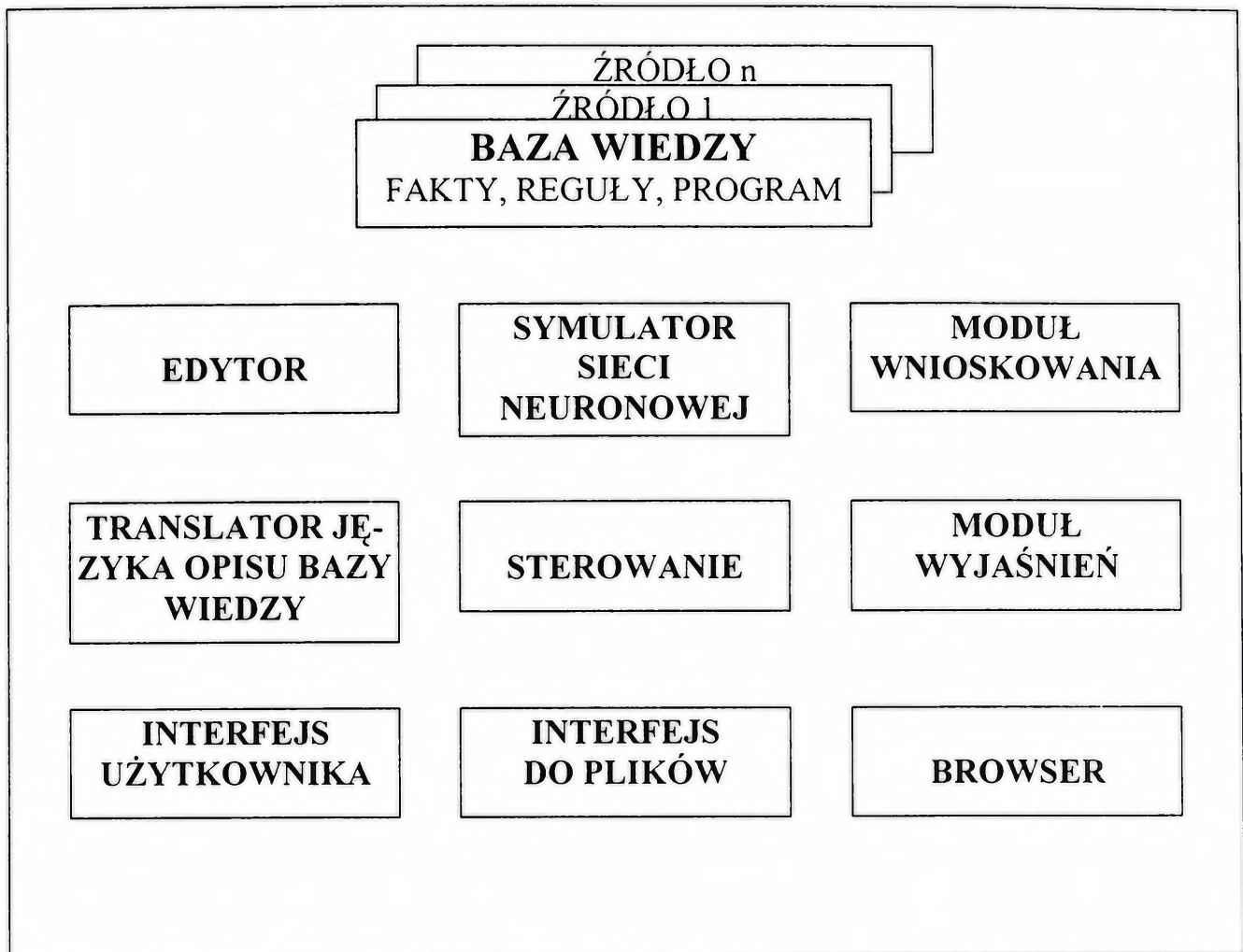
Architektura systemu PC-Shell jest hybrydowa, integrując system ekspertowy i symulator sieci neuronowej. Połączenie to nie jest jedynie mechaniczne, lecz nastąpiła tu integracja zarówno na poziomie architektury systemu jak i języka reprezentacji wiedzy. Symulator sieci neuronowej występuje tu w podobnej roli jak źródło wiedzy w ramach architektury tablicowej. To podobieństwo wyraża się nie tylko w zakresie funkcjonalnym ale również formalnym, dotyczącym sposobu reprezentacji wiedzy. Korzyścią płynącą z takiego rozwiązania i oryginalną cechą systemu PC-Shell jest możliwość tworzenia hybrydowych aplikacji, gdzie odbywa się pełna kooperacja pomiędzy symulatorami sieci neuronowych a systemem ekspertowym. Dla przykładu, obie technologie mogą być wykorzystane do rozwiązania określonych podproblemów w ramach większego problemu, a rozwiązania cząstkowe - dzięki pełnej integracji - mogą być swobodnie przekazywane z jednej technologii do drugiej.

System PC-Shell jest więc systemem hybrydowym charakteryzującym się w zakresie struktury systemu o następującymi cechami:

- architekturą tablicową,
- pełną integracją w ramach systemu PC-Shell systemu ekspertowego oraz symulatora sieci neuronowej (stąd hybrydowość).

System PC-Shell składa się z następujących elementów (rys. 5-2):

1. modułu sterującego,
2. translatora języka opisu bazy wiedzy,
3. modułu wnioskującego,
4. modułu wyjaśnień,
5. symulatora sieci neuronowych,
6. zewnętrznego edytora bazy wiedzy,
7. interfejsu użytkownika,
8. interfejsu do plików dyskowych.



Rys. 6-2. Architektura systemu PC-Shell

### Sterowanie

Podstawowym zadaniem modułu sterującego jest koordynowanie wszelkich procesów realizowanych przez system PC-Shell. Jednym z jego zadań jest komunikacja z użytkownikiem poprzez interfejs użytkownika. Interfejs ten pracuje w trybie tekstowym i opracowany został w taki sposób, by sugerował użytkownikowi określone warianty działania w danym kontekście, uwalniając go tym samym od konieczności ich pamiętania.

### Bazy wiedzy

W odróżnieniu od klasycznych programów komputerowych wiedza zawarta w bazie wiedzy opisuje dziedzinę problemową bez podania szczegółowego sposobu rozwiązania danego problemu (algorytmu). Dzięki temu jest dużo bardziej czytelna, nawet dla osób nie będących specjalistami w dziedzinie SE, ujmują bowiem głównie merytoryczną stronę zagadnienia. Baza wiedzy przyjmuje na ogół postać pliku na dysku kom-

putera. Przechowywana w nim wiedza jest zapisana za pomocą określonego języka reprezentacji wiedzy, na który najczęściej składa się opis faktów (wiedza o charakterze faktograficznym), reguł stosowanych w procesie wnioskowania oraz w przypadku niektórych systemów - metareguł, opisujących strategię rozwiązywania danego problemu.

PC-Shell jest systemem regułowym, stąd całość wiedzy o charakterze heurystycznym jest kodowana za pomocą reguł i faktów. Podstawową metodą reprezentacji wiedzy jest trójka (obiekt, atrybut, wartość).

Regułowa reprezentacja wiedzy wykorzystuje formalne zapisy i twierdzenia logiki. Reguły zapisywane są w następującej postaci:

*JEŻELI fakt<sub>1</sub> I fakt<sub>2</sub> I ... I fakt<sub>n</sub> TO konkluzja.*

Oznacza to, że jeżeli prawdziwe są przesłanki reguły (fakt<sub>1</sub>, fakt<sub>2</sub>, ... fakt<sub>n</sub>) to prawdziwa jest także konkluzja. W związku z tym, iż przesłanki oraz konkluzje traktuje się jako wartości logiczne (prawda, fałsz), to reguły takie nazywa się predykatami, a ich przetwarzanie rachunkiem predykatów. Jedną z możliwych postaci wyrażenia rachunku predykatów są tzw. klauzule Horna. Ich struktura jest zbliżona do generalnej postaci reguł wnioskowania z pewnymi dodatkowymi ograniczeniami wynikającymi z zasad rachunków predykatów - przesłanki muszą być w postaci koniunktywnej oraz dopuszczalna jest tylko jedna konkluzja. Jak już wcześniej wspomniano, w bazie wiedzy systemu, oprócz wiedzy nabywanej przez system, istnieje wiedza (metawiedza) opisująca sposób zachowania się systemu - np. w trakcie procesu wnioskowania. Wiedza taka jest najczęściej zapisywana w postaci reguł. Reguły te mogą być poddawane zmianom w trakcie pracy systemu - mogą być one zmieniane przez sam system.

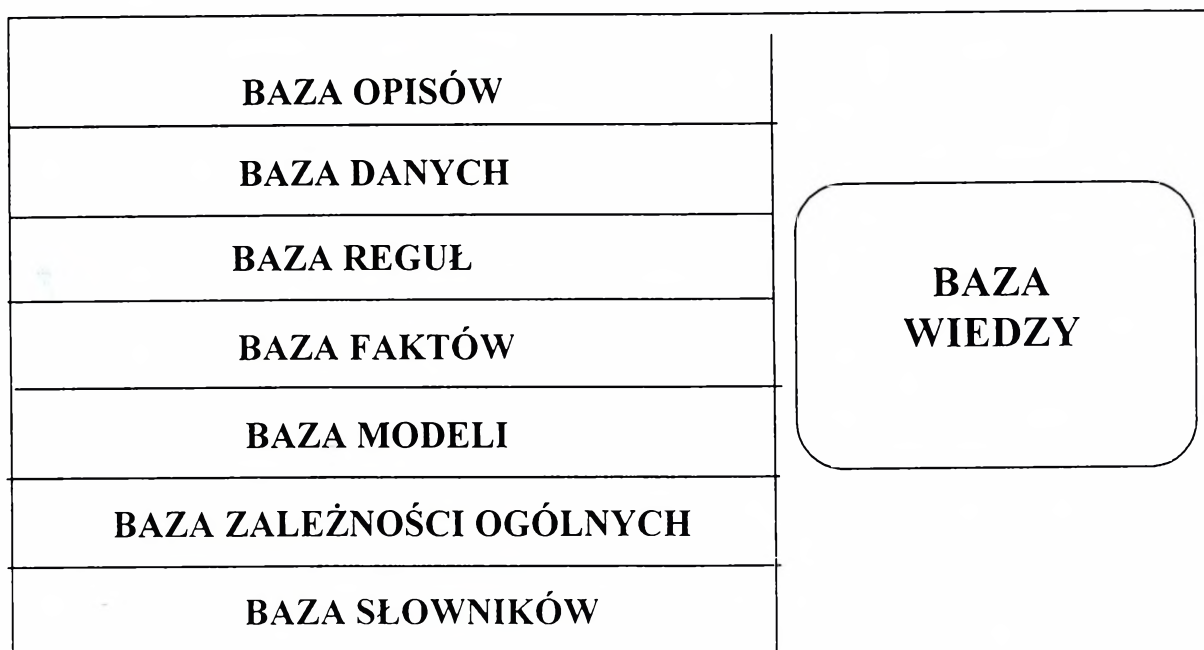
Baza wiedzy systemu ekspertowego jest jego zasadniczą częścią (obok modułu wnioskowania). Struktura bazy wiedzy jest bezpośrednią konsekwencją wyboru metody reprezentacji wiedzy. W bazie wiedzy zapisane są wszystkie informacje, które posiada system i które może wykorzystać. Poprawny wybór struktury bazy wiedzy gwarantuje możliwość bezbłędnej pracy systemu. Błędy na etapie wyboru metody reprezentacji mogą uniemożliwić uzyskanie rozwiązania. W zależności od konkretnych rozwiązań, baza wiedzy może składać się z kilku zasadniczych części. Na ogół baza wiedzy zawiera:

- bazę opisów,
- bazę danych,

- bazę reguł,
- bazę faktów,
- bazę modeli,
- bazę zależności ogólnych,
- bazę słowników.

Baza opisów zawiera ogólne informacje z zakresu rozpatrywanej dziedziny. Są one przechowywane w mało sformalizowanej postaci (całe opisy lub ich fragmenty).

Typowa baza danych może też być częścią bazy wiedzy. Dane mogą być tu przechowywane np. w postaci relacji i przetwarzane zgodnie z przyjętymi dla relacyjnej bazy danych zasadami. Baza danych dołączana jest do systemów ekspertowych najczęściej z powodów komercyjnych, w celu zwiększania ich możliwości i połączenia wszystkich funkcji, które muszą wykonywać osoby obsługujące.



Rys.6-3. Struktura bazy wiedzy systemu ekspertowego

Zasadniczą częścią bazy wiedzy systemu jest baza reguł. Zawiera opis wiedzy zgodnie z przyjętą metodą reprezentacji (w naszym przypadku w postaci reguł). Moduł wnioskowania operuje właśnie na tej części bazy wiedzy, pozostałe stanowią jedynie uzupełnienie. Baza reguł może mieć największy udział w bazie wiedzy (pod względem zajętości pamięci). Ważna jest zatem optymalizacja wykorzystania pamięci.

Przed rozpoczęciem procesu wnioskowania (lub w trakcie jego wykonywania) zbierane są przez system fakty opisujące rozpatrywany problem. Trafiają one do wydzielonej części bazy wiedzy, nazwanej baza faktów. Zebrane w systemie fakty stano-

wią punkt wyjściowy do przeprowadzenia procesu wnioskowania, w trakcie którego mogą zostać ustalone nowe fakty, także zapisywane w tej części bazy wiedzy. Fakty te w procesie wnioskowania stają się przesłankami, na podstawie których wyciągane są kolejne konkluzje (wnioski).

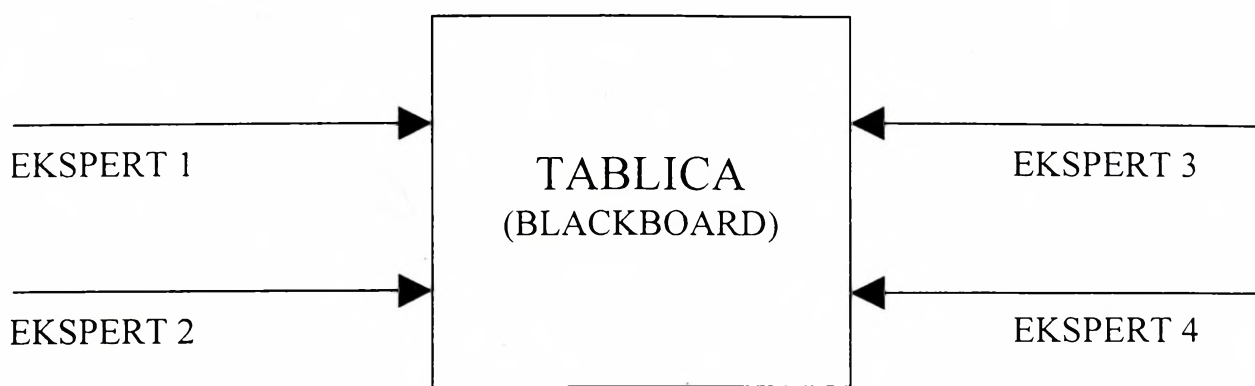
Baza modeli zawiera opis tej części wiedzy, która jest dokładnie zdefiniowana. Mogą być w niej przechowywane modele obliczeniowe zjawisk fizycznych, które opisywane są przez ustaloną liczbę parametrów. Wykorzystanie modeli polega na nadaniu wartości części z nich w celu uzyskania wartości pozostałych parametrów. Umiejętne wydzielenie modeli obliczeniowych z analizowanej dziedziny może w znaczny sposób przyspieszyć działanie systemu, a jednocześnie umożliwić uniknięcie przypadkowych błędów. Część bazy wiedzy zawierająca informacje o sposobach posługiwania się wiedzą zgromadzoną w systemie (baza zależności ogólnych) to tak zwana metawiedza, czyli wiedza o wiedzy.

Jedynie w dużych systemach w bazie wiedzy wydziela się specjalne miejsce do przechowywania zasad funkcjonowania systemu. Ułatwia to komunikowanie się z otoczeniem, pracę modułu wnioskowania oraz kontrolę stanu wiedzy (jej niesprzeczności, nadmiarowości).

Baza słowników zawiera określenia i sformułowania specjalistyczne z rozpatrywanej dziedziny wiedzy. Posługiwanie się takimi pojęciami w trakcie komunikacji z użytkownikiem może w znaczny sposób ułatwić wzajemne porozumiewanie się. Fachowe zwroty i sformułowania zwiększają wiarygodność rozwiązań prezentowanych przez system - budzą zaufanie.

Wybór struktury bazy wiedzy systemu zależy od decyzji projektowych inżyniera wiedzy. Dokonuje on wyboru, które z wymienionych elementów będą wchodziły w skład bazy wiedzy.

System PC Shell ma architekturę tablicową. Istota systemów tablicowych opiera się na analogii ze sposobem, w jaki może współpracować kilku ekspertów rozwiązujących pewien problem (rys. 5-4). Każdy z nich włącza się do rozwiązania wspólnego problemu w zakresie jego kompetencji, a tworzone przez nich rozwiązania pośrednie zapisywane są na tablicy.



Rys. 6-4. Istota modelu tablicowego

W systemach tablicowych wiedza ekspercka nie jest zgromadzona w jednym miejscu (np. pliku), lecz rozproszona w postaci kilku wyodrębnionych fizycznie modułów, zwanych źródłami wiedzy (ang. knowledge sources). Poszczególne źródła wiedzy odpowiadają ekspertom z podanego przykładu. Ponadto zakłada się istnienie wspólnej, tj. dostępnej dla wszystkich źródeł, tablicy komunikacyjnej (ang. blackboard), będącej rodzajem pamięci roboczej. Każde źródło może posiadać własny mechanizm wnioskujący.

W systemie PC-Shell zaimplementowano niektóre elementy przedstawionego modelu tablicowego. W obecnej wersji system umożliwia podzielenie bazy wiedzy na mniejsze fragmenty, wyodrębnione tematycznie (problemowo). Narzędziem umożliwiającym załadowanie i uaktywnienie wybranych źródeł wiedzy są instrukcje getSource i solve. Nie zakłada się formalnie wyodrębnionych mechanizmów wnioskujących przypisanych do źródeł, ponieważ w przypadku komputerów sekwencyjnych nie ma to większego znaczenia. Natomiast dostępne w systemie PC-Shell instrukcje inicjujące mechanizm wnioskujący pozwalają osiągnąć podobny efekt praktyczny. Rolę tablicy pełni tu część obszaru pamięci operacyjnej, w którym umieszczana jest baza wiedzy.

W systemie PC-Shell wymaga się istnienia modułu głównego bazy wiedzy, który jako jedyny może być ładowany bezpośrednio w ramach opcji Plik. Wyłącznie moduł główny bazy wiedzy może zawierać opisy plików, faset oraz program. Źródła wiedzy mogą zawierać tylko reguły i/lub fakty. Moduł główny nie może zawierać reguł i faktów, pełniąc jedynie rolę sterującą oraz funkcję kontrolną.

Podstawową korzyścią z podzielenia bazy wiedzy na odrębne źródła jest możliwość rozwiązywania problemów dla których niezbędne są duże i bardzo duże bazy wiedzy. Zyskuje się przez to na szybkości działania systemu oraz na oszczędności pamięci operacyjnej. Rozwiązanie to ułatwia również proces utrzymywania bazy wiedzy, stanowiąc udogodnienie dla inżyniera wiedzy.

## **Moduł pozyskiwania wiedzy**

Wiedza znajdująca się w bazie wiedzy może pochodzić z różnych źródeł, najczęściej jednak pochodzi od ekspertów lub innych specjalistów z danej dziedziny. Pozyskaniem wiedzy eksperckiej oraz jej formalizacją, tj. zapisaniem za pomocą określonego języka reprezentacji wiedzy, zajmuje się informatyk - tzw. inżynier wiedzy. Inżynier wiedzy to nowa profesja powstająca na gruncie sztucznej inteligencji. Proces pozyskiwania wiedzy jest na ogół bardzo pracochłonny i realizowany w toku współpracy inżyniera wiedzy i eksperta. W przypadku tradycyjnego podejścia do pozyskiwania wiedzy, stosuje się różne techniki takie jak dialog z ekspertem lub obserwacja eksperta podczas rozwiązywania przez niego konkretnych problemów. Panuje pogląd, że proces pozyskiwania wiedzy stanowi "wąskie gardło" budowy systemów ekspertowych. Dlatego badania naukowe zmierzają do automatyzacji tego procesu za pomocą tzw. algorytmów indukcyjnych, które są w stanie wygenerować reguły dla bazy wiedzy na podstawie zbiorów uczących. Zbiory te, ujęte w postaci tzw. plików uczących, zawierają najczęściej dane z przeszłości opisujące sytuację problemową oraz wynikającą z niej konkluzję człowieka. Na podstawie tych danych system uczy się rozwiązywania podobnych problemów samodzielnie.

W tak zwanych tablicowych systemach ekspertowych wiedza może być rozproszona w kilku plikach, tzw. źródłach wiedzy. Każde ze źródeł wiedzy może przechowywać wtedy wiedzę służącą do rozwiązania innego podproblemu.

Zanim wiedza ekspercka zostanie wprowadzona do bazy wiedzy, musi być wcześniej odpowiednio sformalizowana (skodyfikowana). Do tego celu w systemie PC-Shell wykorzystuje się tzw. język opisu bazy wiedzy. Wyrażony w tym języku opis bazy wiedzy może być utworzony i zapisany w pamięci dyskowej komputera za pomocą dowolnego edytora tekstowego pracującego w kodzie ASCII. Zadaniem translatora języka opisu bazy wiedzy jest czytanie pliku dyskowego zawierającego opis bazy wiedzy, tłumaczenie i wprowadzenie odpowiedniego kodu do bazy systemu PC-Shell, mieszczącej się w całości w pamięci operacyjnej komputera.

## **Moduł wnioskowania**

W odróżnieniu od konwencjonalnych systemów, systemy ekspertowe nie zawierają jawnego opisu sposobu rozwiązania danego problemu (algorytmu). To system ekspertowy, a ściślej jego część zwana modułem wnioskującym (ang. inference engine) rozwiązuje problem, wykorzystując wiedzę deklaratywną w bazie wiedzy. Moduł wnio-

skowania realizowany jest najczęściej w oparciu o zasady logiki formalnej.

Baza wiedzy stanowi tylko podstawę do wnioskowania w systemie ekspertowym. Wnioskowaniem zajmuje się moduł wnioskowania. Zadaniem modułu wnioskowania jest analiza przesłanek i wyciąganie z nich wniosków (konkluzji) lub znalezienie przesłanek potwierdzających postawioną hipotezę. Możemy mieć oczywiście do czynienia z jeszcze innymi strategiami wnioskowania, niemniej jednak dwie wymienione są najczęściej używane, a języki zorientowane na przetwarzanie wiedzy są na ogół wyposażone w stosowne konstrukcje programowe.

Poszukiwanie rozwiązań nie jest problemem samym w sobie. System ekspertowy nie jest po to, by poszukiwał rozwiązań. On ma je podawać (proponować użytkownikowi; najlepiej jeżeli nie będzie to jedno rozwiązanie, lecz kilka, uszeregowanych np. według wiarygodności). Stąd, jeżeli będziemy dysponować pełniejszą wiedzą (szerszą bazą wiedzy), to na ogół będziemy mogli ograniczyć poszukiwania, co uczyni nasz system bardziej efektywnym (a przynajmniej szybszym).

### **Moduł wyjaśnień**

Unikatową cechą systemów ekspertowych jest ich zdolność do automatycznego generowania różnego rodzaju objaśnień w trakcie konsultacji z użytkownikiem, w szczególności zaś wyjaśnień dotyczących sposobu rozwiązania problemu. Wyjaśnienia tworzone są przez tzw. moduł wyjaśniający (ang. explanation facility). Obecnie spotyka się najczęściej trzy rodzaje wyjaśnień:

- Jak? (ang. how) - odpowiadające na pytanie "W jaki sposób system wyproduził dany zbiór konkluzji"; wyjaśnienia mają w tym przypadku charakter retrospektywny i pokazują logiczny wywód systemu.
- Dlaczego? (ang. why) - ten rodzaj wyjaśnień odpowiada na pytanie "dlaczego system zadał użytkownikowi dane pytanie". Wyjaśnienia te uzasadniają celowość pytania, poprzez pokazanie bieżącego kontekstu wnioskowania oraz tego jak odpowiedź na dane pytanie przyczyni się do rozwiązania problemu.
- Co to jest? (ang. what is) - wyjaśnienia te są tekstami objaśniającymi pojęcia zawarte w bazie wiedzy. Wyjaśnienia są tak ważnym i specyficznym elementem technologii systemów ekspertowych, że można zaryzykować stwierdzenie, że system który jest ich pozbawiony nie jest systemem ekspertowym.

Użytkownicy systemów ekspertowych często są zainteresowani sposobem rozwiązania problemu postawionego systemowi. Zdolność systemu ekspertowego do wyjaśnień, w tym zwłaszcza konkluzji i potwierdzanych hipotez, jest jedną z najważniejszych cech tej klasy systemów, odróżniającą tę technologię od konwencjonalnych programów.

Wyjaśnienia udzielane przez system powinny przekonać użytkownika do poprawności zastosowanego rozumowania. Jednakże mogą one być podstawową do weryfikacji bazy wiedzy, jeśli użytkownik stwierdzi, że wyjaśnienia przedstawione przez system są nieprzekonujące. Wydaje się, że wyjaśnienia można również traktować jako narzędzie uruchomieniowe, ułatwiające lokalizowanie nieprawidłowości w bazie wiedzy, zwłaszcza w początkowych etapach jej tworzenia.

System PC-Shell dostarcza retrospektywnych wyjaśnień (typu jak) rozumowania, które umożliwiło wyprowadzenie danego zbioru konkluzji lub potwierdzenie postawionej hipotezy. W czasie konsultacji system ekspertowy często pyta o obecność określonych symptomów (faktów). W takich sytuacjach użytkownik może mieć wątpliwości, czy zadane mu pytanie ma związek (lub jakiego rodzaju jest to związek) z rozwiązywanym problemem. W tym celu system PC-Shell dostarcza wyjaśnień typu dlaczego (ang. "Why" explanations). W ramach tego typu wyjaśnień system pokazuje użytkownikowi jaka hipoteza jest rozważana oraz w jaki sposób odpowiedź na pytanie systemu dostarczy informacji niezbędnej do potwierdzenia bądź odrzucenia tej hipotezy. PC-Shell dostarcza również wyjaśnień w formie tzw. metafor, będących objaśnieniami do reguł prezentowanych podczas wyjaśnień typu "How". Ponadto dostępne są również wyjaśnienia typu co to jest, będące tekstowymi objaśnieniami pojęć zawartych w bazie wiedzy. Należy podkreślić, że system PC-Shell umożliwia kontrolowanie zakresu oraz głębokości wyjaśnień.

### **Modele funkcjonujące**

Efektom działania systemu ekspertowego (wynikiem otrzymywanym na wyjściu systemu) może być:

- diagnoza - rozumiana jako ocena stanu istniejącego na podstawie posiadanych danych lub rozpoznania zmian stanu (monitoring),
- prognoza - rozumiana jako przewidywanie stanu przyszłego na podstawie istniejących danych,
- plan - rozumiany jako opis pewnego stanu, do którego należy dążyć.

Jest możliwe łączenie typów pracy systemu ekspertowego w jeden system. Łącząc diagnozę, prognozę i planowanie otrzymuje się system sterujący. Tabela<sup>17</sup> 5-1 zawiera zestawienie różnych rodzajów systemów ekspertowych.

Tabela 6-1

<b>Kategoria</b>	<b>Zadania realizowane przez SE</b>
Interpretacyjne	dedukują opisy sytuacji z obserwacji lub stanu czujników (rozpoznawanie mowy, obrazów, struktur danych)
Predykcyjne	wnioskują o przyszłości na podstawie danej sytuacji, (prognoza pogody, rozwój choroby)
Diagnostyczne	określają wady systemu na podstawie obserwacji (elektronika, medycyna, mechanika)
Kompletowania	konfigurują obiekty w warunkach ograniczeń (konfigurowanie systemów)
Planowania	podjąją działania, aby osiągnąć cel (ruchy robota)
Monitorowania	porównują obserwacje z ograniczeniami (elektrownie, medycyna, ruch uliczny)
Sterowania	sterują zachowaniem systemu; obejmują interpretowanie, predykcję, naprawę i monitorowanie zachowania się obiektu
Poprawiania	podają sposób postępowania w przypadku złego funkcjonowania obiektu, którego systemy dotyczą
Naprawy	ustalają harmonogram czynności przy dokonywaniu napraw uszkodzonych obiektów
Instruowania	systemy doskonalenia zawodowego

Podstawowe obszary zastosowań systemów ekspertowych przedstawione są w tabeli 6-2:

Tabela 6-2

<b>Zastosowanie</b>	<b>Obszary zastosowań</b>			
	<b>Bankowość i ubezpieczenia</b>	<b>Przemysł</b>	<b>Handel i usługi</b>	<b>Sektor publiczny i inne</b>
Monitorowanie Sterowanie	obserwacja trendów	nadzorowanie procesów, sterowanie procesami, raportowanie sytuacji szczególnych	obserwacja trendów	monitorowanie urządzeń i systemów
Projektowanie		projektowanie zakładów i produktów	wybór asortymentów, doradztwo	sieci (pocztowe, energetyczne, telekomunikacyjne, transportowe)
Diagnostyka	kredyty, analiza ryzyka, przetwarzanie skarg	wykrywanie uszkodzeń, utrzymanie zdolności produkcyjnej	kredyty, analiza ryzyka	diagnozy (medyczne, techniczne)
Planowanie	analiza ryzyka, planowanie inwestycji	projektowanie funkcji logicznych, planowanie projektu	analiza ryzyka, analiza rynku	planowanie inwestycji, planowanie na wypadek klęski, planowanie dystrybucji

<sup>17</sup> za Mulawka J.J.: Systemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1997

### 6.3. Rokowania badawcze i perspektywa zastosowań

Niezależnie od przyjętego modelu ocenowego potencjału, którego istota tkwi w zastosowaniu podejścia systemowego, należy dokonać:

- wyboru istotnych cech systemu,
- wyboru kryteriów oceny systemu,
- ustalenia rodzaju oceny systemu,
- ustalenia metody oceny systemu,
- określenia sposobu zastosowania ocen.

System ekspertowy może się okazać przydatny w realizacji każdej z powyższych czynności. Może być także narzędziem, za pomocą którego zaimplementowano przyjętą metodę oceny. Przemawia za tym fakt, że model ekspertowy jako jedyny umożliwia jednoczesne zastosowanie metod werbalnych jak i kwantytatywnych do określenia uogólnionej oceny potencjału.

## BIBLIOGRAFIA DO ROZDZIAŁU 6

1. Liderman K, Miernictwo i diagnostyka systemów komputerowych, Elementy systemów ekspertowych, WAT, Warszawa 1992
2. Mulawka J.J.: Systemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1997
3. Raczyński L, Istota i funkcjonowanie systemów ekspertowych, Praca studyjn, AON, Warszawa 1997.
4. Świątnicki Z.: Wojskowe systemy ekspertowe, Wyd "Bellona", Warszawa 1995.
5. Świątnicki Z. Wantoch-Rekowski R., : Systemy ekspertowe, WAT, Warszawa 1995.
6. Turski W.M.: Propedeutyka informatyki. PWN, Warszawa 1988

## ZAKOŃCZENIE

W opracowaniu pt. "ANALIZA SYSTEMÓW I PROGRAMÓW KOMPUTEROWYCH POD WZGLĘDEM ICH PRZYDATNOŚCI W PRACACH DOTYCZĄCYCH OCEN POTENCJAŁOWYCH), stanowiącym II etap projektu badawczego nr OT00A 055 18 pt. **SYMULACYJNE MODELE POTENCJAŁU OBRONNEGO PAŃSTWA I POTENCJAŁU BOJOWEGO SIŁ ZBROJNYCH** przedstawione zostały charakterystyki podstawowych klas modeli możliwych do uzyskania wartości ocenowych systemu obronnego państwa i systemu sił zbrojnych.

Zaprezentowane zostały modele następujących klas:

- Kalkulacyjne;
- Optymalizacyjne;
- Taksonomiczne;
- Symulacyjne;
- Ekspertowe.

Przedstawiono istotę każdego z tych modeli, jego podklasy i typy, główne dziedziny ich zastosowań oraz perspektywy ich zastosowania w rozwiązaniu problemów ocenowych badanych przedmiotów.

W dalszych rozważaniach nastąpić powinna koncentracja badawcza nad modelami taksonomicznymi o orientacji symulacyjnej. Wydaje się, że modele takie, ze swojej natury są najbardziej adekwatne do opisu przedmiotów w wielowymiarowej przestrzeni kryterialnej oraz ze względu na ich nierealizowalność (i niemierzalność wielu istotnych ich charakterystyk) jakimi są system obronny państwa i system sił zbrojnych.

Określenie **oceny** uogólnionej potencjału obronnego państwa i bojowego sił zbrojnych, uzyskanej przez zastosowanie jakiegoś **modelu ocenowego** jest problemem niezwykle trudnym do realizacji, a wynik zawsze kontrowersyjny. W szczególności dla zwolenników metod werbalnych<sup>18</sup>, a nie przedstawicieli metod ilościowych (*kwantytatywnych*). Jednocześnie zawsze autorzy metod ilościowych również zdają sobie sprawę

z dokonanych redukcji i uproszczeń. Niemniej wyniki metod ilościowych są pożądane<sup>19</sup>. Przede wszystkim do opracowania lub tworzenia:

- (1) analiz studialnych SZ i SOP,
- (2) systemów porównawczych różnych systemów obronnych państw /SOP/ przeznaczonych do planowania strategicznego i operacyjnego,
- (3) metod szacowania obecnych i prognozowanych stanów równowagi (nierównowagi) militarnej.

Przedstawione modele (metody) różnych klas posiadają różnorodne znaczenie dla rozwiązywanego problemu - określenia potencjału obronnego państwa i potencjału bojowego sił zbrojnych. Faktycznie problem dotyczy oceny kwantytatywnej wartości systemu obronnego państwa i wartości bojowej sił zbrojnych.

Ocena SZ i SOP w postaci **potencjału bojowego SZ i potencjału obronnego państwa** może być traktowana jako propozycja stosowania udokumentowanej oceny ilościowej wartości SZ i SOP. Przeprowadzana systematycznie może pokazywać trendy występujące w SZ i SOP poszczególnych państw. Natomiast połączona z innymi:

- (1) modelami (metodami) może być zastosowana do przeprowadzania regionalnego i / lub indywidualnego szacowania zagrożenia, uwidaczniającego słabe punkty i konieczne zmiany SZ i SOP;
- (2) danymi (wskaźnikami), np. czasu i / lub kosztów może być użyta do szacowania trendów finansowych występujących w SZ i SOP.



<sup>18</sup> Analiz intuicyjnych opartych na miernikach naturalnych i znacznie mniej wymiernych miernikach, opartych o indywidualne sądy ocenowe podmiotów oceniających.

<sup>19</sup> Jeśli analizy prowadzi się w skali *macro* podejście takie jest uzasadnione, chociaż nie tylko wtedy.