

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ  
КУРС ЛЕКЦІЙ  
для студентів напрямку “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані  
технології”

Вступ.....	5
1. Методологія системного аналізу.....	12
1.1. Основні терміни та визначення.....	12
1.2. Класифікація систем.....	16
1.3. Закономірності великих (складних) систем.....	20
1.4. Методи та об'єкти системного аналізу.....	24
1.5. Системний підхід при аналізі ТК.....	30
Контрольні питання.....	36
2. Структурний аналіз складних систем управління	37
2.1. Функціональна, організаційна та технічна структура....	38
2.2. Формалізація опису структури системи на основі гра- фових моделей.....	41
2.3. Структурний аналіз об'єкта.....	50
2.4. Моделювання технічної структури ССУ.....	55
2.5. Декомпозиція технічної структури ССУ.....	58
Контрольні питання.....	59
3. Системний аналіз процесу управління в складних системах.....	60
3.1. Системний аналіз багаторівневих ієрархічних структур.....	60
3.2. Класи задач та види управління.....	63
3.3. Типові функціональні структури систем управління.....	65
Контрольні питання.....	81
4. Розв'язання системних задач з використанням методології	

нечітких множин.....	81
4.1.Формалізація та перероблення якісної інформації.....	81
Нечіткі множини.....	
4.2. Функції належності.....	91
4.3. Принципи і структура систем управління з нечіткими регуляторами.....	98
Контрольні питання.....	103
5. Координація в складних системах управління.....	104
5.1. Постановка задачі координації в двохрівневій структурі.....	104
5.2. Процедури та алгоритми координації.....	108
Контрольні питання.....	115
6. Моделювання процесу функціонування складних систем управління .....	115
6.1. Формальний опис процесу функціонування ССУ.....	116
6.2. Опис процесу функціонування ієрархічної системи управління ТК.....	118
6.3. Агрегативні моделі функціонування ССУ.....	125
Контрольні питання.....	131
7. Інформаційні характеристики ССУ.....	131
7.1. Інформація в задачах управління.....	131
7.2. Класифікація та визначення видів інформації в ССУ....	134
7.3. Ентропія та її змінювання в складних системах.....	139
7.4. Ентропійно-інформаційні співвідношення процесу управління.....	144
Контрольні питання.....	150

8. Прийняття рішень в складних системах.....	150
8.1. Проблема вибору та прийняття рішень.....	150
8.2. Моделі прийняття рішень в складних системах управління.....	156
8.3. Системи підтримки прийняття рішень.....	169
Контрольні питання.....	192
9. Синтез складних систем управління.....	192
9.1. Постановка задачі. Методи архітектурного та системо- технічного синтезу.....	192
9.2. Синтез оптимальної технічної структури системи управління.....	196
9.3. Застосування штучних нейронних мереж в системах управління.....	203
9.4. Методи реінжинірінгу при створенні складних систем управління.....	217
9.5. Методи дослідження операцій в системному аналізі.....	220
Контрольні питання.....	225
Література.....	226

## **ВСТУП**

Сучасний системний аналіз – прикладна наука, яка орієнтована на виявлення причин реальних складностей, які виникають перед “власником проблеми” (звичайно - це конкретна організація, установа, підприємство, колектив) та на формування варіантів їх усунення.

Системний аналіз – сукупність методологічних засобів, які використовуються для підготовки та обґрунтування рішень із складних проблем політичного, військового, соціального, економічного, технічного та наукового характеру. Основою є системний підхід та ряд методів, математичних дисциплін і сучасної теорії управління. Основна процедура – побудова узагальненої моделі, яка відображає взаємозв'язки реальної ситуації, технічна основа – ЕОМ та інформаційні системи. Часом “системний аналіз” та “системний підхід” використовуються як синоніми.

Об'єктивна необхідність виникнення дисципліни “системний аналіз”, сам системний аналіз полягають у потребі проведення досліджень міждисциплінарного характеру:

- створення складних технологічних та виробничих комплексів;
- створення складних систем управління ними;
- аналіз економічної ситуації;
- аналіз складних сучасних економічних відносин;
- соціально-політичні аспекти;
- аспекти міжнародних відносин та політики і інш.

Для цього повинні були сформуватись нетрадиційні методи досліджень, уніфікації та узгодження інформації.

Це – комплексні, а краще – системні дослідження, які стали можливими і набули особливого розвитку в епоху ЕОМ, тому в нашому випадку термін “системний аналіз” буде означати сукупність методів, заснованих на використанні ЕОМ та орієнтованих на дослідження складних систем – технічних, економічних, екологічних і ін. Результат системних досліджень – вибір цілком конкретної альтернативи: план розвитку, параметри конструкції, структура і т.д.

Системний аналіз – дисципліна, яка займається проблемами прийняття рішень в умовах, коли вибір альтернативи потребує аналізу складної інформації різної фізичної природи.

Основна задача дисципліни: показати, як різні знання (математика, теорія управління, методи оптимізації...), начебто різні та на перший погляд мало зв’язані, можуть служити розв’язанню складних прикладних задач, а системний інтегратор стає однією з головних діючих осіб, архітектором, конструктором складних систем. Для конструювання та дослідження складних систем немає наборів рецептів, є лише методологія, в кожному випадку потрібні різностороння культура, винахідливість та талант.

Методи системного аналізу для розв’язання складних комплексних проблем застосовуються з урахуванням того, що в процесі прийняття рішень вибір необхідно робити в умовах невизначеності. Процес системного аналізу з кожної проблеми можна розділити на чотири стадії:

- постановка проблеми, визначення мети та критеріїв оцінки;
- структурний аналіз досліджуваної системи;
- розробка концепції розвитку системи та підготовка можливих варіантів;

- безпосередній аналіз відібраних варіантів рішень та їх наслідків.

За допомогою основного інструментарію – ПЕОМ найбільш вдало поєднуються формальні й неформальні методи; експериментальні, евристичні та строгі математичні начала.

Системність – не досягнення науки, не деяке нововведення, а загальна властивість матерії, форма її існування, тобто невід’ємна властивість практики, включаючи мислення. Однак будь-яка діяльність може бути в різній степені системною. Так поява проблеми – ознака недостатньої системності; розв’язання проблеми – результат підвищення системності.

Науково-технічна революція привела до виникнення таких понять як складні та великі системи, що мають специфічні властивості та характерні проблеми. Необхідність розв’язання складних проблем, подолання якісних та кількісних перешкод визвали до життя множини прийомів, методів, підходів, які перетворились в решті-решт у певну технологію, серед яких:

- методи проектування;
- методи інженерної творчості;
- системотехніка;
- дослідження операцій;
- системний підхід;
- політологія;
- футурологія;
- імітація моделювання;
- методологія експерименту і т.д.

Системність світу та людського пізнання й практики – об’єктивно існуюча дійсність, тому на загальнонауковому рівні і розвивається:

- системологія;
- загальна теорія систем;
- теорія організації;
- кібернетика;
- інформатика;
- штучний інтелект.

Об’єктивною реальністю є також великі та складні системи, що викликало необхідність розробки методів для їх створення й дослідження. Повинна була виникнути прикладна наука – “міст” – між абстрактними теоріями системності та новою системною практикою – системний аналіз – із своїми об’єктами, арсеналом засобів та практичним досвідом.

Головна мета системного аналізу – ліквідація проблеми або, як мінімум, виявлення її причин. Тому використовується широкий спектр засобів, можливості різних наук – математики, обчислювальної техніки, моделювання, експериментальних досліджень та інш.

Яким повинен бути спеціаліст-системотехнік? Звичайно, неможливо бути професіоналом із кожної науки, але він повинен розпізнавати та класифікувати конкретні проблеми, залучати інших спеціалістів для розв’язання складних задач, мати широку ерудицію, організовувати колективи.

На сьогодні системні уявлення досягли такого рівня, що корисність та важливість системного підходу для розв’язання складних проблем стали звичними, загальноприйнятими та вийшли за рамки



спеціальних дисциплін. Більше того, відсутність системності часто є причиною неправильних рішень.

Вище вже вказувалось, що системність існує об'єктивно, але вона має різні рівні, тому розв'язання проблеми завжди означає перехід на новий, більш високий рівень системності. Системність це не стільки стан, скільки процес. Уже навіть зараз можна сказати, що ми підійшли до інтуїтивного розуміння понять “система”, “системний аналіз” і ін.. У процесі навчання системність завжди підвищується, а зараз назовемо кілька найбільш поширених систем:

- суспільно-політична;
- сонячна;
- нервова;
- опалювальна;
- рівнянь;
- знань;
- переконань.

Що в цих поняттях спільного? В першу чергу – системність.

Будь-яка діяльність людини системна, а очевидними та обов'язковими ознаками системності є:

- структурованість;
- взаємний зв'язок складових частин;
- підлеглість, підпорядкованість організації всієї системи певній меті.

Цілеспрямована діяльність людини при розв'язанні певних проблем пов'язана з алгоритмічністю, тобто певною послідовністю дій. Алгоритми можуть бути не лише в математиці чи управлінні, а й при навчанні, грі в шахи, винахідництві, композиції музики і т.д. При

цьому; допускаючи примусовість логічних дій, ми знаємо, що там можуть бути присутніми дії, які не форма-лізуються – творча діяльність, інтуїція, поняття краси та смаку.

Тут основними моментами є:

- будь-яка діяльність алгоритмічна;
- не завжди алгоритми реальної дійсності виконуються свідомо (композитор, шофер – "не думаючи");
- при незадовільному результаті можлива причина невдачі може бути в недосконалості алгоритму. Тоді необхідно підвищувати системність діяльності.

Для сфери діяльності таких спеціалістів важливо, що удосконалення виробництва, систем управління ним завжди пов'язане з підвищенням системності. Можна виділити три рівні системності праці:

- механізація;
- автоматизація;
- кібернетизація, в першу чергу використання інтелектуальних систем.

Однією з об'єктивних причин виникнення системних наук є системність мислення (у першу чергу – структурованість, виділення підпроцесів аналізу та синтезу). Системність характерна також для результату пізнання, представлення знань.

Обговорюючи об'єктивні причини розвитку системних уявлень, варто відзначити, що до найважливіших причин цього відносяться системність практичної діяльності людини та внутрішня системність мислення людини.

В курсі лекцій основна увага приділяється використанню методів системного аналізу для створення складних систем управління, в першу чергу комп'ютерно-інтегрованих, об'єктами яких є технічні комплекси або промислові підприємства в цілому. Основними задачами тут є: визначення загальної структури системи; організація необхідної взаємодії між підсистемами і елементами; урахування впливу зовнішнього середовища; оптимізація структури системи; розробка оптимальних алгоритмів функціонування.

Проектування складних систем управління поділяють на дві стадії: макропроектування (зовнішнє), коли методами системно-технічного та архітектурного синтезу розв'язуються задачі функціонально-структурного характеру; мікропроектування (внутрішнє), коли розробляються технічні рішення в рамках проекту системи.

[1,с.5-15]

#### Контрольні питання

1. В чому полягає необхідність системних досліджень?
2. Назвіть основні задачі системних досліджень.
3. В чому полягає системність світу?
4. Поясніть рівні системності праці: механізація, автоматизація, кібернетизація.
5. Які основні етапи розвитку системних уявлень?

## 1. Методологія системного аналізу

У відповідності із сучасними уявленнями прикладний системний аналіз – наукова дисципліна, яка на основі системно організованих, структурно взаємозв'язаних та функціонально взаємодіючих евристичних процедур, методологічних засобів, математичного апарата, програмного забезпечення і обчислювальних можливостей комп'ютерних систем та мереж забезпечує в умовах концептуальної невизначеності отримання та накопичення інформації про досліджуваний предмет для наступного формування знань про нього як єдиного, цілісного об'єкта з позицій поставлених цілей дослідження і прийняття раціонального рішення в умовах різномірних багатомірних ризиків.

### 1.1. Основні терміни та визначення

Основними поняттями в системному аналізі є система, велика система, складна система, підсистема, елемент і інш.

Під системою розуміють складні структури, які взаємодіють із навколишнім середовищем як єдине ціле, а великі системи та складні системи включають значну кількість елементів та підсистем. Часто поняття системи визначають через їх ознаки та властивості. Будемо користуватися трьома визначеннями поняття системи:

**Система** - це сукупність взаємозв'язаних елементів, уособлена від зовнішнього середовища, але яка діє з цим середовищем як єдине ціле.

**Система** – це засіб досягнення мети.

Це визначення базується на тому, що будь-яка діяльність людини має цілеспрямований характер. Відповідність мети й системи неоднозначне, а саме: різні системи можуть орієнтуватись на одну

мету, а одна система може мати різні цілі. Перших два визначення об'єднуються в третє.

**Система** – це функціонально визначена структурно впорядкована з адаптивною реорганізацією множина елементів. Зовнішні та внутрішні функції систем, їх ієрархічні або однорівневі структури характеризуються відповідними обмінними потоками, адаптивна організація та дезорганізація систем є визначальною для їх існування властивістю.

*Елемент* – це найпростіша неподільна частина системи, а її властивості визначаються конкретною задачею.

Елемент завжди зв'язаний із самою системою. Елемент складної системи може бути у свою чергу складною системою в іншій задачі.

*Підсистема* – компонента системи, як об'єднання елементів, але за масштабом менша ніж система в цілому.

Якщо розглядати технологічний комплекс, то елементом може бути технологічний процес, технологічний апарат чи конкретна конструкція, підсистемами виступають об'єднання технологічних процесів чи апаратів на рівні технологічних відділень чи цехів. Цукрове виробництво: бурякопереробне відділення, очистка соку, випарювання і т.д.

З точки зору задач управління завжди існує оптимальна кількість підсистем  $N$ , яка приводить до найвищих техніко-економічних показників. Кількість підсистем залежить від структури загальної системи управління: децентралізовані, централізовані, розподілені системи управління. Кількість підсистем залежить також від того, як

організована переробка речовини та енергії, тобто від кількості технологічних операцій.

*Структура* – це зображення елементів та зв'язків між ними. Тут розглядається функціональна, алгоритмічна, технічна, організаційна структура. Передбачається, що система має два і більше рівнів управління.

*Зв'язок* – найбільш важливим є те, що тут використовуються узагальнені оцінки (наприклад, зв'язки: направлений чи ненаправлений, сильний чи слабкий, додатний чи від'ємний). Зв'язок однозначно характеризує структуру системи.

*Стан* – це миттєва оцінка або фаза розвитку системи. Для системи управління вектор стану  $X$  визначається векторами управління  $U$  та збурення  $Z$  і у свою чергу визначає значення вихідної змінної  $Y$ .

*Рівновага* – це певний усталений стан, а перехід з одного стану в інший буде називатися поведінкою системи.

**Запис системи в символічній формі.** В залежності від кількості факторів, степені абстрактності можна надати ряд визначень системи  $D$  (від лат. definition).

$D_1$ . Система – деяке ціле

$$S=H(1,0) \quad (1.1)$$

Визначається факт існування та цілісність. Двійкове судження  $H(1,0)$  відображає наявність або відсутність цих якостей.

$D_2$ . Система – організована множина

$$S=(\text{орг}, M) \quad (1.2)$$

орг – оператор організації;  $M$  – множина.

Д3. Система – множина речей, властивостей та відношень

$$S = ( \underset{\text{речі}}{\{m\}}, \underset{\text{властивості}}{\{n\}}, \underset{\text{відношення}}{\{r\}} ) \quad (1.3)$$

Д4. Система – множина елементів, які утворюють структуру і забезпечують певну поведінку в умовах навколишнього середовища:

$$S=(\varepsilon, ST, BE, E) \quad (1.4)$$

$\varepsilon$  – елементи; ST – структура; BE – поведінка; E – середовище.

Д5. Система – множина входів, виходів, станів, які характеризуються функцією переходів і функцією виходів

$$S=(X, G, s, \delta, \lambda) \quad (1.5)$$

X – входи; G – виходи; S – стани;  $\Delta$  – функція переходів;  
 $\lambda$  – функція виходів.

Д6. Це визначення важко формулюється. Відповідає рівню біонічних систем і враховує генетичне (родове) начало GN, умови існування КД, обмінні явища MB, розвиток EV, функціонування FC та репродукцію (відтворення) RP

$$S=( GN, КД, MB, EV, FC, RP) \quad (1.6)$$

Д7. Це визначення оперує поняттями моделі F, зв'язку SC, перерахунку R, самонавчання FL, самоорганізації FO, провідності зв'язків CO та збудження моделей IN:

$$S=( F, SC, R, FL, FO, CO, IN) \quad (1.7)$$

Д8. Визначення Д5 доповнюється факторами часу та функціональними зв'язками:

$$S=(T, X, G, S, \Omega, V, \eta, \varphi) \quad (1.8)$$

T – час; X – входи; G – виходи; S – стани;  $\Omega$  – клас функцій на виході;  
V – значення функцій на виході;  $\eta$  – функціональний зв'язок в рівнянні.

$$g(t_2) = \eta(X(t_1), s(t_1), t_2) \quad (1.9)$$

$\varphi$  - функціональний зв'язок в рівнянні,

$$s(t_2) = \varphi(X(t_1), s(t_1), t_2) \quad (1.10)$$

Д<sub>9</sub>. Для організаційних систем зручно використовувати цілі і плани PL, зовнішні і внутрішні ресурси RO, RJ, виконавців EX, процес PR, перешкоди DT, контроль SV, управління RD ефект EF:

$$S = (PL, RO, RJ, EX, PR, DT, SV, RD, EF) \quad (1.11)$$

Можна продовжувати і далі до DN, але важливо: складно компактно визначити поняття „система”.

## 1.2. Класифікація систем

В системному аналізі класифікація займає особливе місце, враховуючи множину критеріїв, які характеризують структуру системи, її призначення, особливості функціонування і інш. Найбільш вживаними при класифікації систем є такі критерії.

За субстаціональною ознакою можна виділити три класи систем:

- природні, які існують в об'єктивній дійсності (нежива і жива природа, суспільство). Приклади систем – атом, молекула, жива клітина, організм, популяція, суспільство;
- концептуальні, або ідеальні системи, які відображають реальну дійсність, об'єктивний світ. Сюди відносять наукові теорії, літературні твори, тобто системи, які з різним ступенем повноти відображають об'єктивну реальність;
- штучні, які створені людиною для досягнення конкретної мети (технічні чи організаційні).



При використанні системного аналізу для задач синтезу та аналізу складних систем управління використовують таку класифікацію систем за:

- видом об'єкта – технічні, біологічні, організаційні і інш.;
- науковим спрямуванням – математичні, фізичні, хімічні і інш.
- видом формалізації – детерміновані, стохастичні;
- типом цілеспрямованості – відкриті та закриті;
- складністю структури і поведінки – прості і складні;
- ступенем організованості – добре організовані, погано організовані (дифузні), із самоорганізацією.

Добре організовані системи – це такі, для яких можна визначити окремі елементи, зв'язки між ними, правила об'єднання в підсистеми та оцінити зв'язки між компонентами системи та її цілями. В цьому випадку проблемна ситуація може описуватись у вигляді математичних залежностей, які зв'язують мету та засоби її досягнення – критеріїв ефективності чи оцінками функціонування. Розв'язання задач аналізу та синтезу в добре організованих системах здійснюється аналітичними методами. Приклади: сонячна система, яка описує найбільш суттєві закономірності руху планет; опис роботи електронного пристрою за допомогою системи рівнянь, які враховують особливості роботи; аналітичні моделі об'єктів управління і інш.

Для відображення досліджуваного об'єкта у вигляді добре організованої системи виділяють найбільш суттєві фактори та відкидають другорядні .

В добре організованих системах використовується, в основному, кількісна інформація.

Погано організовані системи. Для таких систем характерним є відображення та дослідження не всіх компонентів, а лише деяких наборів макропараметрів та закономірностей за допомогою певних правил виборки. Наприклад, при отриманні статистичних закономірностей їх переносять на поведінку систем з деякими показниками ймовірності. Характерним для цих систем є використання багатокритеріальних задач з численними припущеннями та обмеженнями. Приклади: системи масового обслуговування, економічні та організаційні системи.

В погано організованих системах використовується, в основному, якісна інформація, зокрема нечіткі множини.

З поняттями “добре організована” та “погано організована” системи тісно зв’язані терміни “добре визначена” та “погано визначена” системи.

Системи із самоорганізацією. Такі системи мають ознаки дифузних: стохастичність поведінки та нестационарність параметрів. В той же час вони мають чітко визначену можливість адаптації до змінювання умов роботи. Частинним випадком системи із самоорганізацією для управління технічними об’єктами є адаптивні системи з еталонними моделями чи ідентифікатором, що розглядається в дисципліні “Теорія автоматичного управління”.

В останні роки сформувався новий напрям прикладного системного аналізу – синергетика – наука про загальні процеси самоорганізації в складних нерівноважних структурах, яка висуває наукові пояснення процесів нерівноважної впорядкованості, наприклад в економічній реальності.

Великі системи. Існує ряд підходів до виділення систем за складністю та масштабами. Наприклад, для систем управління зручно користуватись класифікацією за числом (кількістю) елементів:

- малі ( $10$ - $10^3$  елементів);
- складні ( $10^4$ -  $10^7$  елементів);
- ультраскладні ( $10^8$ - $10^{30}$  елементів);
- суперсистеми ( $10^{30}$ - $10^{200}$  елементів).

Часто розділяють поняття “великі” та “складні” системи. Так, англійський кібернетик С.Бір всі кібернетичні системи розділяє на прості та складні в залежності від способу опису: детермінованого чи теоретико-ймовірнісного. Російський кібернетик Д.І. Берг всі кібернетичні системи класифікує на прості та складні в залежності від способу опису: складну систему можна описати не менше між двома математичними мовами, наприклад за допомогою диференціальних рівнянь та методами алгебри Буля.

Раніше наводилось кілька визначень основного поняття “система”. Таким же чином пояснимо поняття “велика” та “складна” система. Складність полягає в тому, що чіткої границі між цими термінами немає. Так в теорії систем великою (складною, системою великого масштабу, Large Scale Systems) називають таку, яка складається з великої кількості взаємозв’язаних та взаємодіючих елементів та може виконувати складні функції. Однією з ознак складної системи управління є показник живучості: при відмові певної кількості елементів система продовжує виконувати свої функції, хоча і з меншою ефективністю (проста система може бути лише в двох станах: працездатності та відмови).

Велика система – це завжди сукупність матеріальних та енергетичних ресурсів, засобів отримання, передачі та обробки інформації, людей, які приймають рішення на різних рівнях ієрархії.

Нарешті, зручно користуватись такими визначеннями:

- складна система – впорядкована множина структурно взаємозв'язаних та функціонально взаємодіючих різнотипних систем, які об'єднані структурно в цілісний об'єкт функціонально різnorodними взаємозв'язками для досягнення заданих цілей в певних умовах;

- велика система об'єднує різнотипні складні системи.

Тоді можна повернутись до визначення системи, а саме:

- система – впорядкована множина структурно взаємозв'язаних та функціонально взаємодіючих однотипних елементів будь-якої природи, об'єднаних в цілісний об'єкт, склад та межі якого визначаються цілями системного дослідження.

Характерні особливості великих систем:

- значна кількість елементів;
- взаємозв'язок та взаємодія між елементами;
- ієрархічність структури управління;
- наявність людини в контурі управління та необхідність прийняття рішень в умовах невизначеності.

### **1.3. Закономірності великих (складних) систем**

Закономірності великих чи складних систем дозволяють розглянути їх основні властивості незалежно від фізичної природи (стійкість, розвиток, адаптація, саморегулювання та ін.).

Цілісність системи. Тут розглядається дві взаємозв'язані сторони:

- властивості системи, як цілого не є сумою властивостей елементів чи підсистем;
- властивості системи, як цілого залежить однозначно від властивостей елементів, підсистем.

В цьому проявляється складність системи, її поведінка відносно зовнішнього середовища та внутрішній розвиток. При виділенні окремих елементів чи підсистем вони також можуть бути складними системами, але для інших задач. При оцінці цілісності виділяється два фактори:

- прогресуюча факторизація, як прагнення системи до такого стану, коли окремі частини набувають незалежності;
- прогресуюча систематизація, як зменшення системою названої автономності елементів чи систем.

*Інтегративність системи* – ця закономірність з'єднана однозначно з попередньою (цілісністю), але інтегративність підкреслює внутрішні процеси системи, як збереження цілого. Головним в інтегративності є системоутворюючі та системо-зберігаючі фактори.

Для складних систем управління та комп'ютерно-інтегрованих структур цими факторами є ЕОМ і мікропроцесорні засоби, об'єднані у відповідні мережі. В технічних системах, особливо комп'ютерно-інтегрованих структурах, розглядаються такі види інтеграції:

- програмна інтеграція;
- технічна інтеграція;
- алгоритмічна інтеграція;
- організаційна інтеграція.

*Комунікативність системи.* Ця закономірність характеризує особливі зв'язки системи із зовнішнім середовищем, дає можливість виділити елементи, як системи нижчих порядків. Для КІСУ комунікативність проявляється в потоках інформації, а також у структурах, тобто в мережах різного рівня й призначення, в тому числі корпоративних.

*Корпоративна мережа* – це обчислювальна мережа на рівні підприємства, фірми чи їх об'єднань у якій одночасно циркулює інформація різного призначення, тобто технологічна й техніко-економічна.

*Ієрархічність системи* – це закономірність, яка показує, що жива природа та технічні системи завжди мають кілька рівнів організації, прийняття рішень, задач і т.д. Для автоматизованих технологічних комплексів виділяють різні види управління: технологічний апарат (ТА), відділення, підприємство. Тут головними є такі сторони:

- за допомогою ієрархічних уявлень можна відображати системи з різними невизначеностями;
- визначення кількості рівнів, побудова всієї ієрархічної системи завжди залежить від задачі та від мети системи.

В теорії систем визначальним є поняття функції чи задачі, які розподіляють за рівнями на підзадачі, утворюється ієрархічна структура підзадач. Ієрархічній структурі підзадач відповідає своя структура математичних моделей та обмежень. Ці дві структури знаходять відображення в технічній структурі, тобто в ієрархії технічних засобів.

*Історичність системи.* Складні системи функціонують та розвиваються з урахуванням часу.

*Закон необхідної різноманітності.* Доказано, що для створення системи, яка може розв'язати складну проблему, яка має різноманітність, необхідно, щоб система управління мала ще більшу різноманітність. Важливо, щоб ця різноманітність могла створюватись в самій системі. В ТАУ існує принцип складності, згідно з яким для управління складним об'єктом повинна використовуватись також складна система управління.

Часто розглядаються також проблеми здійсненності та закономірності цілеутворення.

#### **Узагальнення понять складних систем**

1. Загальними ознаками складних систем (біологічних, технічних, соціально-економічних) є те, що кожна з них представляє собою структурно організовану сукупність більш простих частин (підсистем), взаємозв'язаних та взаємодіючих у процесах цілеспрямованого функціонування системи.
2. Кожна із систем входить як підсистема в склад більш крупної системи (старшого рангу); у свою чергу підсистеми (крім елементарних), можуть представлятись як системи молодшого рангу.
3. Системи взаємодіють із зовнішнім середовищем, що реалізується через зовнішні зв'язки: вхідні та вихідні.
4. Процес функціонування системи у вузькому сенсі – процес перетворення ресурсів на вході в цільові кінцеві результати основної діяльності на виході.

5. Ефективність основної діяльності системи характеризується відношенням цільових кінцевих результатів до затрат ресурсів на досягнення цих результатів та на усунення (або обмеження в допустимому діапазоні) негативних наслідків функціонування.
6. Цілеспрямованість процесів функціонування проявляється в намаганні підтримувати та підвищувати високу ефективність системи, адаптуючись до змін зовнішнього середовища.
7. Процеси функціонування системи (у широкому смислі) – сукупність процесів основної діяльності в різних за масштабами процесів розвитку та удосконалення систем.
8. Математичний опис процесів функціонування системи – математична модель, але при дії нестационарних випадкових сигналів процеси функціонування часто не можна описати математично, тобто формалізувати.
9. Процеси функціонування систем потребують управління, яке реалізується за рахунок цілеспрямованих дій та зворотних зв'язків.
10. Процес управління: збір інформації; її аналіз та контроль; вироблення управляючої дії; її реалізація.
11. Сукупність органів управління системи та підсистем усіх рівнів разом з інформаційними зв'язками (внутрішні та зовнішні) – ієрархічна система управління.

#### **1.4.Методи та об'єкти системного аналізу**

Ці методи засновані на тому, що розглядаються різні явища без розкриття процесів, які там відбуваються, а враховуються лише формальні зв'язки між різними факторами та характер їх зміни під



впливом зовнішніх умов. Методи системного аналізу об'єднують математичні методи, комп'ютерні технології, теорії автоматичного управління, дослідження операцій, що приводить до об'єктивної необхідності залучати знання з різних наук.

Для методів системного аналізу система – це формальний зв'язок між спостережуваними ознаками та властивостями. Для опису поведінки систем використовуються методи теорії інформації та прийняття рішень. В теорії систем традиційні математичні методи (диференціальні, різницеві рівняння і т.д.) не дозволяють повністю описати реальні процеси в складних системах, тому поряд із кількісною інформацією використовується якісна інформація, зокрема, теорія нечітких множин – чітко структуровані задачі, в яких використовується лише кількісна інформація, замінюються слабоструктурованими або неструктурованими. Вводиться поняття лінгвістичної змінної.

В подальшому розглядаються методи, які використовуються для таких складних систем, як технологічний комплекс автоматизований технологічний комплекс, комп'ютерно-інтегрована система управління, корпоративні мережі (ТК, АТК, КІСУ, КМ).

### **Принципи системного підходу**

- принцип кінцевої мети: абсолютний пріоритет кінцевої (глобальної) мети;
- принцип єдності: сумісний розгляд системи як цілого і як сукупності систем (елементів);
- принцип зв'язності: розгляд будь-якої частини сумісно з її зв'язками з оточенням;

- принцип модульної побудови: корисно виділити модулі в системі і розглядати її як сукупність модулів;
- принцип ієрархії: доцільно вводити ієрархію частин (елементів) та (чи) їх ранжування;
- принцип функціональності: сумісний розгляд структури й функцій з пріоритетом функцій над структурою;
- принцип розвитку: урахування змінюваності системи, її здатності до розвитку, розширення, заміни частин, накопичування інформації;
- принцип децентралізації: поєднання в приймаємих рішеннях та управлінні централізації та децентралізації;
- принцип невизначеності: урахування невизначеностей та випадковостей в системі.

**Риси системного підходу.** *Системний підхід* – конкретно-науковий метод, який має загальнонаукове значення.

Системний підхід характеризується високим рівнем спільності, але одразу виникає питання: системний підхід до чого? Тому спочатку розглядається сутність системного підходу до вивчення, дослідження (аналізу) систем, а потім встановлення особливості використання системного підходу до розв'язання конкретних проблем.

Методологія аналізу складних об'єктів, вивчення та пізнання процесів, які протікають в них, пов'язані з теорією пізнання. Підхід до вивчення складного об'єкта передбачає розгляд його як складної системи.

Використання системного підходу зручно формувати, опираючись на ознаки систем.

1. Визначено однозначно, що система – сукупність взаємозв'язаних підсистем, тому вивчення системи завжди починають із визначення її структури – кількості підсистем, їх зв'язності (відношень), тобто вивчення кожної з підсистем ведеться з урахуванням зв'язків між ними, а не ізольовано. Важливо виявити найбільш суттєві зв'язки, так звані *системоутворюючі*, які найбільше впливають на результати досліджень.

2. Властивості системи завжди є не просто сукупністю (сумою) властивостей підсистем. В процесі аналізу всі властивості й показники систем в залежності від впливу на них ефекту взаємодії підсистем діляться на:

*цілісні (інтегративні, емерджентні)* – такі властивості, функції та показники, які має лише система, наприклад, виготовлення складної промислової продукції;

*адитивні* – властивості та показники систем, які визначаються лише можливостями підсистем та представляють їх суму, наприклад: прибуток, обсяг нормативно-чистої продукції галузі – сума цих показників окремих підприємств, що не залежить від внутрішніх зв'язків системи на відміну від випуску товарної продукції, що визначається за заводським методом.

3. Підсистеми взаємодіють в процесі ціленаправленого функціонування системи, тому особливого значення набуває визначення та вивчення мети функціонування системи. Фактичні цілі функціонування підсистем повинні відповідати цілям системи, тобто існує *принцип єдності цілей*. Якщо він порушується - його необхідно поновити, що дає суттєвий ресурс підвищення ефективності функціонування системи.

4. Система завжди зв'язана з іншими системами, тобто із зовнішнім середовищем вхідними та вихідними зв'язками, тому необхідно:

врахувати вплив зовнішнього середовища на досліджувану систему та результати цього впливу;

оцінювати функціонування системи з урахуванням її впливу на інші (зовнішнє середовище) за рахунок вихідних зв'язків, враховувати наслідки цих впливів.

5. Сама досліджувана система та інші, з якими вона зв'язана (зовнішнє середовище) – часто є динамічними, які розвиваються, тобто суттєву роль грає *фактор часу* з двох точок зору:

досліджують як статичні, так і динамічні властивості систем;

досліджується розвиток системи з часом та рушійні сили цього розвитку.

В результаті – важливо визначити прогноз її взаємодії із зовнішнім середовищем.

6. Системний підхід як самостійний методологічний напрямок формувався та розвивався одночасно з розвитком прикладної математики, тому глибина та ефективність дослідження систем визначається і повнотою використання математичних методів.

7. Ієрархічна структура складних систем визначає доцільність індуктивного (від частинного до загального) та дедуктивного (від загального до частинного) методів.

8. Співставлення складних систем різної природи (біологічних, технічних, соціально-економічних) показує, що деякі їх ознаки та закономірності функціонування схожі, тобто для них певною мірою характерний ізоморфізм (незалежність від природи та структури).

Звідси – використання методу аналогій, але потрібна обережність, щоб не довести його до вульгаризації.

В системних дослідженнях широко використовуються процедури декомпозиції та агрегування, які є різними аспектами аналітичного та синтетичного методів дослідження систем. Складна система розчленовується на менш складні частини, які потім можуть об'єднуватись в одне ціле, що дає можливість пояснити ціле через його частини у вигляді структури цілого.

Декомпозиція – розкладання цілого на частини: задачі – на підзадачі; системи – на підсистеми. Це дає можливість спростити загальну задачу, скоротити її розмірність та використовувати більш прості моделі.

Агрегування – об'єднання частин в ціле, що часто дає можливість отримати нові якісні та кількісні показники системи. В цьому проявляються властивість емереджентності, коли нове об'єднання (нова система) має такі властивості, яких не має жоден з елементів, які об'єднуються. Наочний приклад прояву цієї властивості наведено на рис. 1.1

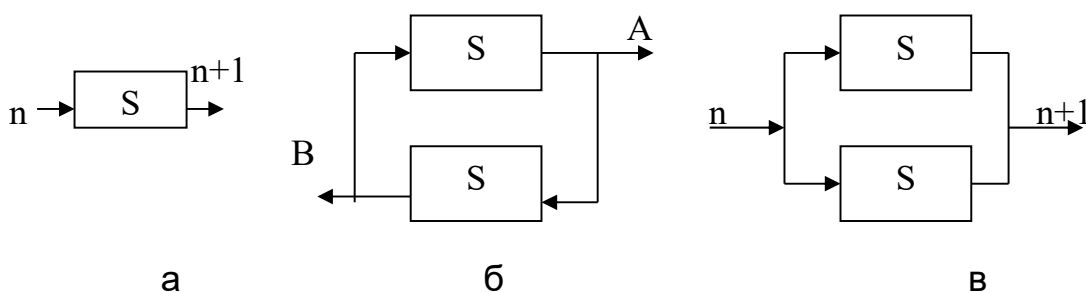


Рис.1.1. Схеми з'єднань елементів

Цифровий автомат S перетворює будь-яке число на вході в нове число на виході, яке на одиницю більше вхідного (рис.1.1.а). При

з'єднанні двох автоматів S в кільце (рис.1.1. б) система генерує зростаючу послідовність на виходах A і B, одна з яких складається з парних чисел, друга – з непарних. При паралельному з'єднанні (рис.1.1.в) реалізується задача резервування.

## **1.5. Системний підхід при аналізі ТК**

### **Ознаки технологічних комплексів як складних систем**

Можна виділити різні ознаки, але головними є ті, які характеризують як деякі якісні сторони, наприклад, кількість елементів, так і якісні. Відомий підхід, коли складною системою (СС) називають таку, математичні моделі якої можна описати принаймні двома способами (детерміновані та стохастичні, теоретикоімовірнісні і т.д.). Для ТК при характеристиці їх як СС виділяють такі ознаки:

- кількість підсистем, особливо це має значення для неперервних ТК. Ці підсистеми, зв'язані між собою складними структурними та функціональними відношеннями;
- можливість управління підсистемами на основі різних критеріїв оптимальності;
- існування для підсистем задач оперативної оптимізації та необхідність координації роботи підсистеми;
- наявність ієрархічної структури;
- необхідність урахування автономності підсистем.

Аналіз ТК як складних систем передбачає визначення та оцінку їх структури, оцінку матеріальних та енергетичних потоків, формування необхідних інформаційних визначень, що дає можливість визначити структуру управління. При побудові автоматизованих ТК

визначається кількість підсистем, розташування точок отримання інформації, розташування пунктів управління та технічна реалізація системи.

**Класифікація ТК.** Ця класифікація може виконуватись за різними ознаками, але вона повинна бути такою, щоб виділити окремі групи (класи) із спільними характерними ознаками.

- За продуктивністю: велико-, середньо- та малопотужні чи продуктивні. В промисловості все більше застосовуються (ТА) технологічні апарати великої одиничної потужності, які можуть замінювати групу апаратів, виділяється середня продуктивність, а велико- та малопроductивні мають відрізнятись у два і більше разів.
- За способом функціонування: неперервні, неперервно-періодичні, неперервно-циклічні та періодичні.
- За кількістю виконуваних функцій: одно - та багатофункціональні або одно- та багатономенклатурні (-асортиментні).
- За кількістю ланок: мало - та багатоланкові.
- За однорідністю: однакові або різні ланки чи підсистеми.
- За способом з'єднання технологічних ланок (технологічною топологією): однонаправлені або зустрічнонаправлені (із зворотними зв'язками) і комбіновані.
- За цільовою функцією (критерієм оптимізації): усі підсистеми можуть мати однакові або різні критерії;
- За характеристиками середовища: рідина, газ...

Для розробки КІСУ, а також систем автоматизації на різному рівні важливими є ще такі ознаки ТК:

- інформаційна потужність, яка характеризує величину інформаційних потоків, тобто визначає характеристики необхідних технічних засобів та їх програмного забезпечення для отримання інформації, її обробки та подання в необхідному вигляді в необхідне робоче місце в певний час. Інформаційна потужність визначається кількістю змінних, які необхідні для управління та контролю ТК: мала потужність до 40 змінних, середня – до 160 змінних, підвищена – до 650 змінних, велика – більше 650 змінних. ТК цукрового заводу має 384 точки контролю та 217 точок управління; спиртовий завод: 501 точка контролю і 132 точки управління.
- за кількістю підсистем, для яких існує і необхідна задача оптимізації виділяються лише ті підсистеми, для яких є відповідні ресурси, а досягнення найвищих техніко-економічних показників для підсистем співпадає з критерієм ТК у цілому.
- за кількістю підсистем, які координуються (узгоджуються) є ТК, для яких робота  $n$ -ої підсистеми потребує зміни умов роботи  $(n-1)$ -ої і  $(n+1)$ -ої підсистем;
- за трудоємкістю задач оптимізації та координації є комплекси, в яких задача оптимізації вимагає значного часу розв'язання і значних обчислювальних потужностей, такі підсистеми координуються трудно.

**Системний аналіз технологічних процесів як об'єктів управління.**



При дослідженні технологічних процесів із позицій задач управління використовуються основні прийоми системного аналізу (системного підходу):

- постановка задачі дослідження;
- вибір критеріїв якості;
- розробка плану експерименту з виділенням основних етапів;
- виконання принципу ієрархії зверху вниз при аналізі та знизу вверху при синтезі складних систем і ін..

З позицій системного аналізу розв'язуються задачі моделювання, оптимізації, управління та оптимального проектування хіміко-технологічних систем (ХТС) в масштабах ТК, відділення, цеху, заводу. Для цього використовуються відповідні математичні моделі.

Умовно неподільними одиницями ТК є технологічний процес (ТП) – нижній рівень ієрархії виробництва. В той же час можлива подальша деталізація цих одиниць до рівня фізико-хімічних ефектів та явищ, що дозволяє, в свою чергу, розглянути окремий хіміко-технологічний процес як складну систему. Важливо розуміти, що одиничний хіміко-технологічний процес із його складним комплексом елементарних фізико-хімічних явищ – *типова велика (складна) система* в смислі її класичного кібернетичного визначення. Рівень складності цієї системи визначається:

- величезною кількістю (многообразиєм) фізико-хімічних ефектів;
- насиченням взаємних зв'язків між цими ефектами;
- одночасним протіканням та взаємозв'язками між різними явищами фізико-хімічної природи в локальних об'ємах;
- нелінійними залежностями між змінними параметрами і т.д.

При системному аналізі виробництва (підприємства) як великої (складної) системи виділяють, як правило, три рівні:

- типові технологічні процеси в апаратурному оформленні (механічні, гідродинамічні, тепло-масообмінні, дифузійні, хімічні...) та локальні системи управління ними;
- ТК, відділення, цехи з відповідними системами управління;
- виробництво, підприємство та системи оперативного управління, організації виробництва, планування, матеріально-технічного постачання, реалізації продукції.

При системному підході створюються автоматизовані системи для оперативного отримання математичних моделей, ідентифікації.

Кожен типовий процес як одиниця першого рівня ієрархії формалізується як фізико-хімічна система (ФХС) – багатофазне багатокомпонентне суцільне природне середовище, розподілене в просторі та змінне в часі, в кожній точці гомогенності якого та на границі розділення фаз відбувається перенос речовини, енергії та імпульсу при наявності джерел (чи стоків) останніх.

Приймаючи до уваги, що на вхід ФХС поступають потоки суцільного середовища, які характеризуються вектором вхідних змінних (склад і температура фаз, тиск, швидкість, густина і т.д.), які проходять цілеспрямовані фізико-хімічні перетворення, можна записати:

$$Y=A(U), \quad (1.12)$$

де  $A$  – оператор (технічний), який формалізує відображення простору змінних входу в простір виходу, відповідно реальному фізико-технічному процесу. Оператор  $A$  є складним: у відповідності із суперпозицією (накладанням) ряду «елементарних» технологічних

операторів – хімічного та фазового перетворень; дифузійного, конвективного та турбулентного перепису речовини та тепла; змішування та ін.. Таким чином, цей оператор відображує сукупність лінійних, нелінійних, розподілених в просторі і змінних в часі процесів та має змішану детерміновано-стохастичну природу.

Коли мова йде про математичну модель, то записують на основі (1.12):

$$\hat{y} = \Phi(U, X), \quad (1.13)$$

де  $\hat{y}$  - простір оцінок змінних виходу.

**Застосування методології системного підходу до створення складних систем управління.** *Методологія* – сукупність прийомів дослідження в науці.

Системний підхід при створенні складних структур управління проявляється в таких підходах:

1. Будь-яка система на першому етапі розглядається з урахуванням лише формальних зв'язків між різними факторами та оцінки характеру їх зміни під впливом зовнішніх умов. Теорія систем своїм об'єктом досліджень має не фізичну реальність, а загальні властивості та зв'язки між різними факторами. При зростанні складності СУ для їх аналізу та синтезу необхідно застосовувати знання з різних наук.
2. Система завжди досліджується в умовах невизначеності (мети, характеристик зовнішнього середовища та поведінки оператора). Важливо забезпечити в системі адаптацію та можливість розвитку.

3. Складність систем управління, їх інформаційна потужність вимагає залучення деяких спеціальних прийомів, наприклад, декомпозиції та агрегування.
4. У складних системах управління (ССУ) завжди використовуються структурні перетворення.
5. В загальній теорії систем повинні використовуватись терміни, методи, поняття та прийоми, які є зрозумілими для інших наукових дисциплін (інформатика та автоматика, вони повинні спілкуватись спільною мовою).
6. В теорії систем застосовуються уніфіковані поняття, які дають можливість охарактеризувати як систему будь-якої складності, так і будь-яку її частину.  
[1,с.16-34;5,с.10-29]

#### Контрольні питання

- 1.Дайте визначення основних термінів: система, елемент, підсистема. Приклади.
- 2.За якими ознаками класифікуються системи? Приклади.
- 3.Наведіть особливості різних систем: велика, складна, із само-організацією, зі ступенем організованості і інш.
- 4.Закономірності великих (складних) систем.
- 5.В чому полягає системний підхід при створенні та аналізі складних систем управління?
- 6.Назвіть основні ознаки технологічних комплексів як складних систем.

## 2. Структурний аналіз складних систем управління

Для цих систем аналізується організаційна, функціональна, технічна структура. Ці структури можна розглядати, як певні моделі, які відображають функції та цілі, які стоять перед системою. В першу чергу враховують ієрархічність системи, тому їх структури завжди будуть багаторівневими. Ця багаторівнева структура допомагає на різних рівнях розглядати з різною деталізацією властивості системи та їх складових. Таким чином, структура – сукупність елементів і зв'язків між ними, які визначаються відповідно до функцій і цілей системи (рис 2.1).

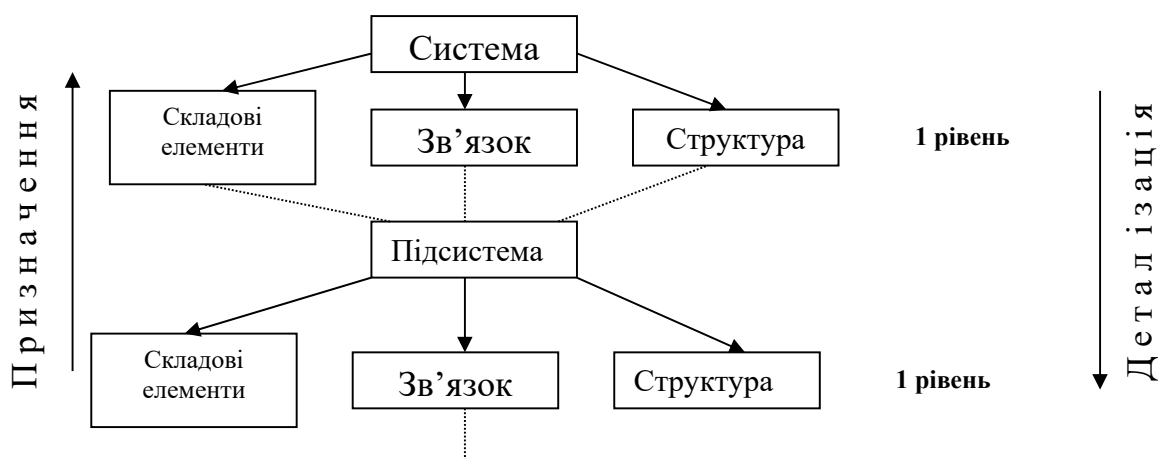


Рис. 2.1 Багаторівневе представлення структури ССУ

Для кожної системи можна поставити у відповідність множину структур із різною кількістю рівнів деталізації, що визначається призначенням структури, так і самою системою. При переміщенні на нижні рівні деталізація завжди збільшується, але призначення системи стає зрозумілим при переміщенні на верхній рівень. Існують системи структуровані (добре структуровані), слабо структуровані і неструктуровані (мало структуровані). У відповідності до цього для

кожного класу систем розробляються відповідні математичні моделі. В структурному аналізі виділяють прийоми декомпозиції та агрегування. Прийом декомпозиції дозволяє цілеспрямовано виділити підсистеми, а другий прийом – агрегування – дозволяє об'єднати деякі підсистеми, щоб утворити технологічний об'єкт управління із заданими властивостями. В результаті структурного аналізу приймається рішення відносно архітектури системного управління, розташування термінальних точок (датчики, регулюючі органи, робочі місця).

## **2.1. Функціональна, організаційна та технічна структура**

Організаційна структура (на прикладі підприємства)

Ця структура призначена для розв'язання таких задач:

- опис складу підсистем та зв'язків між ними;
- визначення функцій підсистем та при необхідності розкриття їх внутрішньої структури;
- опис матеріальних та інформаційних потоків;
- побудова загальної інформаційної структури та відповідних моделей.

Функціональна структура

Дає можливість:

- визначити функції управління в структурних підрозділах існуючої системи;
- обрати функції, які автоматизуються;
- визначення зв'язків між автоматизованими функціями;
- розробки ієрархії задач управління та відповідних моделей.

Технічна структура

Технічна структура відображає основні технічні засоби для отримання інформації та її обробки, а також пристрої для зв'язків між елементами в тому числі мережі.

При аналізі технічної структури:

- визначаються основні елементи, які забезпечують інформаційні процеси: реєстрацію та підготовку, зберігання і видачу інформації;
- складається формальна структурна модель системи технічних засобів з урахуванням топології розташування елементів, їх інформаційної та енергетичної взаємодії між собою та зовнішнім середовищем.

Загальна задача структурного аналізу полягає у визначенні структурних властивостей системи та її підсистеми на основі опису елементів та зв'язків між ними.

При розв'язанні практичних задач структурного аналізу складних систем управління приймаються три рівні опису зв'язків між елементами:

- наявність зв'язку;
- напрямок зв'язку;
- вид та напрямок сигналів, які визначають взаємодію елементів.

На першому рівні досліджуваній системі може відповідати неорієнтований граф, вершинами якого є елементи системи, а ребрами – зв'язки між ними. На цьому рівні основними задачами структурного аналізу є:

- визначення зв'язності (цілісності) системи та виділення зв'язних підсистем із своїми елементами, якщо система в цілому не є зв'язною;
- виділення циклів;

- визначення мінімальних та максимальних послідовностей елементів (ланцюгів), які розділяють елементи.

На другому рівні, коли напрям зв'язку задано, системі відповідає орієнтований граф, напрямок дуг якого співпадає з напрямом зв'язків. Результати структурного аналізу на цьому рівні більш змістовні, а задачами структурного аналізу є:

- визначення зв'язності системи;
- топологічна декомпозиція з виділенням сильно зв'язних підсистем;
- виділення вузлів приймання та видачі інформації;
- виділення рівнів в структурі та визначення їх взаємозв'язку;
- визначення мінімальних та максимальних шляхів;
- визначення характеристик топологічної значущості елементів;
- отримання інформації про слабкі місця структури і т.д.

На третьому рівні опису зв'язків між елементами системи враховується не лише направленість зв'язку, а й розкриваються склад і характер сигналів взаємодії елементів (вхідні, вихідні, керування).

Крім того, при структурному аналізі розв'язуються такі задачі:

- виділення місцевих та загальних контурів керування;
- визначення необхідних конфігурацій при багаторежимному характері роботи;
- оцінка шляхів безпосередньої передачі сигналів.

При незначній початковій інформації про структуру системи, коли враховуються лише наявність і напрямок зв'язку, зручно використовувати апарат теорії графів.



## 2.2. Формалізація опису структури системи на основі графових моделей

Теорія графів – розділ математики, який досліджує властивості різних геометричних схем (графів), які утворені множиною точок та ліній, що їх з'єднують. При структурному аналізі систем елементам ставлять у відповідність вершини графа, а зв'язкам – ребра (вершинний граф). Іноді зручно використовувати реберний граф (елементи – ребра, зв'язки – вершини). В подальшому будемо використовувати вершинні графи.

*Види графів.* Якщо визначена множина елементів  $V$ , то граф  $G = G(V)$  вважається *визначеним*, коли деяке сімейство сполучень елементів або пар виду  $E=(a,b)$ , де  $a,b \in V$ , вказує, які елементи є зв'язані. У відповідності з геометричною інтерпретацією пара  $E=(a,b)$  – ребро, а елементи  $a$  і  $b$  – кінцеві точки ребра, або вершини. Якщо порядок розташування вершини не має значення, то  $E$  – *неорієнтоване ребро*, а якщо це важливо, то  $E$  – *орієнтоване ребро*, *дуга*, причому  $a$  – початкова вершина,  $b$  – кінцева.

В теорії графів використовують також таку термінологію: ребро  $E$  *інцидентно* вершинам  $a,b$ ; вершини  $a$  і  $b$  *інцидентні* ребру  $E$ .

Граф, складений виключно з орієнтованих ребер – *орієнтований*. Відповідно: *неорієнтовані та змішані* графи. Неорієнтований граф можна перетворити в орієнтований заміною кожного ребра  $E$  парою ребер з тими ж кінцями, але протилежної орієнтації (процес подвоєння)

Граф *кінцевий*, коли число ребер кінцеве, та *нескінченний* – у протилежному випадку.

Граф, який складається лише з ізольованої вершини - *нуль-граф*, а граф, ребрами якого є різні пари двох різних вершин  $a, b \in V$  – *повний граф*.

В орієнтованому повному графі є пари ребер по одному в кожному напрямку, які з'єднують будь-які дві різні вершини ( $a$  і  $b$ ).

**Способи формалізованого задання графів.** *Графічне представлення* - найбільш наочне, але не достатнє, його не можна використовувати при роботі на ЕОМ.

*Матричне представлення.* Можуть бути різні форми.

*Матриця суміжності* вершин для неорієнтованого графа:

$$A = \|a_{ij}\|, \quad (2.1)$$

$n$  – кількість вершин.

Елементи  $a_{ij}$  визначаються так:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ при наявності зв'язку} \\ 0 \text{ при відсутності зв'язку} \end{cases} \quad (2.2)$$

Передбачається, що нумерація вершин графа проведена.

Для неорієнтованого графа матриця суміжності є *симетричною*.

В матриці суміжності вершин для орієнтованого графа:

$$A = \|a_{ij}\| \quad (2.3)$$

Елементи визначаються так:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо з вершини } i \text{ можна перейти в вершину } j \\ 0 - \text{ в протилежному випадку.} \end{cases}$$

Вид матриці суміжності орієнтованих графів суттєво залежить від принципу нумерації вершин.

*Матриця інцидентності:*

$$B = \|b_{ij}\| \quad (2.4)$$

$i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m,$

$n$  – кількість вершин;

$m$  – кількість ребер

*Для неорієнтованого графа:*

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } i - \text{а вершина інцидентна } j - \text{му ребру (є зв'язок)} \\ 0 - \text{ немає зв'язку} \end{cases} \quad (2.5)$$

*Для орієнтованого графа:*

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } i - \text{а вершина є початком } j - \text{го ребра} \\ -1, \text{ якщо } i - \text{а вершина є кінцем } j - \text{го ребра} \\ 0, \text{ якщо } i - \text{а вершина не інцидентна } j - \text{му ребру} \end{cases} \quad (2.6)$$

Часто в практичних задачах більшість елементів в матрицях  $A$  і  $B$  є нульовим, що приводить до неефективного використання ЕОМ. Доцільним є множинні способи формалізації структури.

*Множинне представлення.* Для орієнтованого графа  $G(V)$  задається множина вершин та відповідність  $G$ , яка показує, як зв'язані між собою вершини. Відповідність  $G$  в цьому випадку є відображенням множини  $V$  в  $V$ . Для кожної вершини  $i$  відповідність  $G$  визначає множину вершин  $G(i)$ , в які можна безпосередньо потрапити з вершини  $i$ . Часто  $G(i)$  називають *множиною правих інциденцій*.

Множина  $G^{-1}(i)$  визначає всі вершини, з яких можна безпосередньо потрапити в вершину  $i$  - *зворотна відповідність* (відображення). По аналогії множина  $G^{-1}(i)$  називається *множиною лівих інциденцій*. Множинний спосіб більш практичний, особливо для ієрархічних систем.

*Частинний граф та підграф.* Граф  $H$  називається *частинним графом* графа  $G$ , якщо його множина вершин  $V(H)$  є в множині вершин  $V$  графа  $G$  і всі ребра графа  $H$  є ребрами графа  $G$ .

Приклад рис.2.2 :

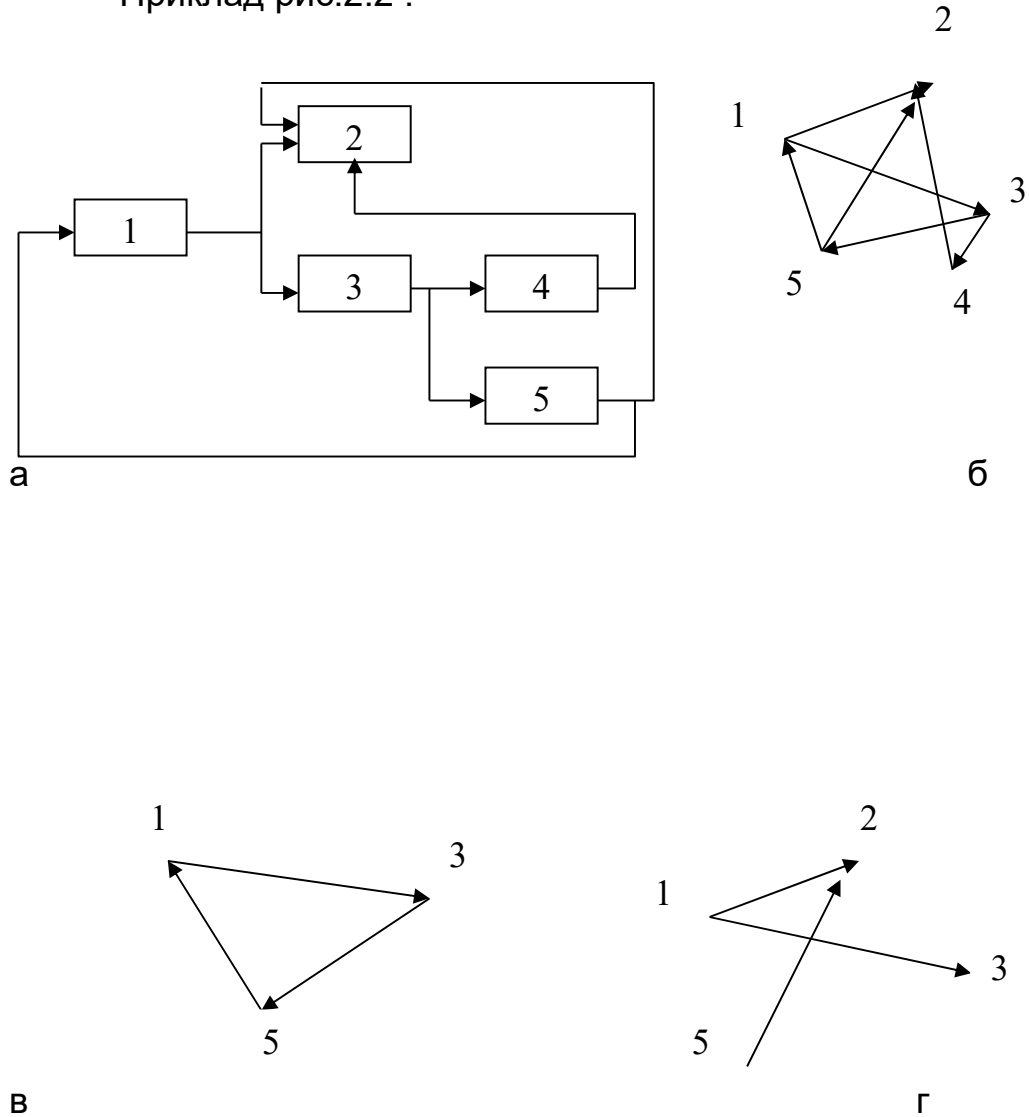


Рис. 2.2. Структура та орієнтований граф системи  
а – структура системи; б – орієнтований граф;  
в-підграф; г – частинний граф

Граф  $G_1(D)$  називається *підграфом* графа  $G(V)$ , якщо множина вершин  $D$  є в множині вершин  $V$  і ребра графа  $G_1$  є всіма ребрами графа  $G$ , кінці яких лежать в множині  $D$ . Якщо  $D=V$ , то підграф  $G(D)$  співпадає з графом  $G(V)$ .

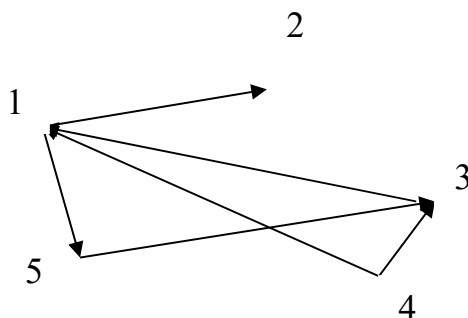
Поняття частинного графа та підграфа є основою для виділення підсистем при аналізі складних систем.

**Ланцюг, шлях, цикл, контур.** Ланцюг – *послідовність ребер  $E_0, E_1 \dots E_{k-1}, E_k \dots$ , коли кожне ребро  $E_{k-1}$  дотикається одним з кінців з ребром  $E_k$ . Ланцюг можна позначити послідовністю вершин, які вони містять. Наприклад, послідовність вершин  $(1,4,3,5)$ ,  $(1,3,5)$  – є ланцюгами. Це поняття частіше використовується для неорієнтованих графів (рис.2.3).*

*Шлях* – послідовність дуг, коли кінець кожної попередньої співпадає з початком наступної, наприклад:  $(1,3)$ ,  $(3,5)$ ,  $(5,1)$  для рис.2.3. Це поняття також використовується для орієнтованих графів.

*Цикл* – кінцевий ланцюг, який розпочинається і закінчується в одній вершині, наприклад:  $(1,4,3,1)$  для рис.2.3. Це поняття має смисл також для неорієнтованих графів.

*Контур* – кінцевий шлях, для якого початкова вершина першої дуги співпадає з кінцевою вершиною останньої дуги шляху: послідовність дуг  $(1,3)$ ,  $(3,5)$ ,  $(5,1)$  – контур (рис.2.2).



### Рис.2.3. Неорієнтований граф

*Довжина ланцюга (шляху)* – число ребер (дуг), які входять в ланцюг (шлях) графа.

Матриця суміжності вершин  $A$  є матрицею безпосередніх шляхів графа, які мають довжину, що дорівнює одиниці. Загальне число транзитних шляхів від вершини  $i$  до вершини  $j$  довжиною  $k$  можна отримати в результаті піднесення до  $k$ -тої степені матриці  $A$ :

$$A^k = AA \dots A = A^{k-1} \cdot A$$

Елемент матриці  $A^k$   $a_{ij}^{(k)}$  визначає кількість шляхів довжиною  $k$  від вершини  $i$  до вершини  $j$ .

*Степінь вершини.* Число ребер, інцидентних вершині неорієнтованого графа, - степінь вершини  $\rho(i)$ . Число дуг орієнтованого графа, які мають початковою вершиною вершину  $i$  – напівстепінь витоку вершини  $i$   $\rho^+(i)$ . Аналогічно, число дуг, які мають кінцевою вершиною вершину  $j$   $\rho^-(j)$ . Сума напівстепенів захода всіх вершин графа, а також сума напівстепенів витоку всіх вершин дорівнюють загальному числу дуг орієнтованого графа  $G(V)$ :

$$\sum_{i=1}^n \rho^+(i) = \sum_{j=1}^n \rho^-(j) = m, \quad (2.7)$$

$m$  – число дуг графа;  $n$  – число вершин графа.

Для неорієнтованого графа

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho(i) = m \quad (2.8)$$

**З'язність графа.** Неорієнтований граф  $G(V)$  називається слабкозв'язним (зв'яз-ним), якщо для будь-яких вершин  $i$  та  $j$  існує ланцюг з вершини  $i$  в вершину  $j$ .

Орієнтований граф  $G(V)$  називається *сильнозв'язним*, якщо для будь-яких вершин існує шлях з вершини  $i$  в вершину  $j$ . Граф на рис.2.3.– слабо-зв'язний.

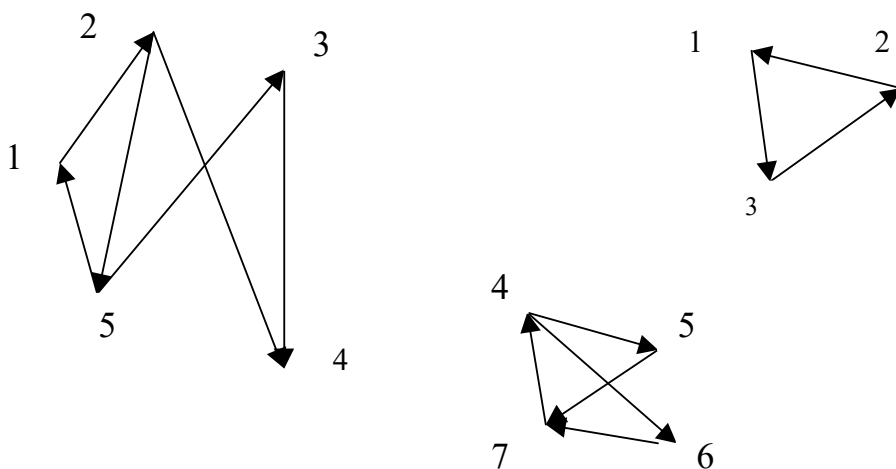


Рис.2.4. а) сильно зв'язний граф

Рис.2.4. б) незв'язний граф з двох сильно зв'язних підграфів

Будь-який *неорієнтований* граф можна розкласти на сукупність зв'язних підграфів; будь-який *орієнтований* – на сукупність сильно зв'язаних підграфів.

**Порядкова функція на графі, поняття рівня.** Порядкова функція на графі без контурів дозволяє розбити множину вершин на підмножини, які не пересікаються, на впорядковані так, що коли вершина входить в підмножину з номером  $i$ , то наступна за нею

вершина – в підмножину з номером, більшим  $i$ . Отримані підмножини не пересікаються - *рівні*.

**Виділення комплексів графах.** Один з перших алгоритмів заснований на операціях з матрицею зв'язності з метою виділення на графі системи, шляхів різної довжини та побудови матриці комплексів.

*Використання матриці шляхів на графі.* Матриця є квадратною, кількість стовпців відповідає кількості елементів в складі ТК. Якщо на графі є шлях будь-якої довжини з вершини  $i$  у вершину  $j$ , то на пересіченні  $i$ -го рядка та  $j$ -го стовпця ставиться одиниця, в протилежному випадку – 0.

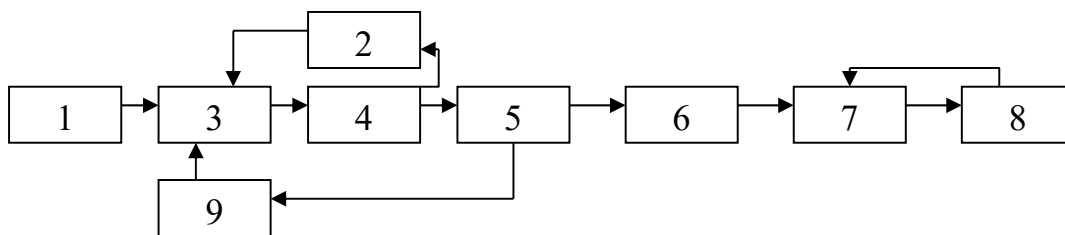


Рис.2.6. Структура системи

**Використання матриці шляхів на графі.** Матриця є квадратною, кількість стовпців відповідає кількості елементів в складі ТК. Якщо на графі є шлях будь-якої довжини з вершини  $i$  у вершину  $j$ , то на пересіченні  $i$ -го рядка та  $j$ -го стовпця ставиться одиниця, в протилежному випадку – 0 (див. табл. 2.1).

На основі матриці  $P$  будується допоміжна матриця  $S$  (див. табл.2.2)



$$S_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } p_{ij} = p_{ji} = 1 \\ 0, \text{ в протилежно му випадку} \end{cases} \quad (2.13)$$

Таблиця 2.1.

Матриця шляхів графа – Р:

І	J								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	1	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1	0
9	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблиця 2.2

Допоміжна матриця S

І	J								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	0	0	0	1
3	0	1	1	1	1	0	0	0	1
4	0	1	1	1	1	0	0	0	1
5	0	1	1	1	1	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1	0
9	0	1	1	1	1	0	0	0	1

На основі матриці S визначаються комплекси, які входять в склад графа ТК. Якщо в і-му рядку є лише один ненульовий елемент  $S_{ii}$  (на головній діагоналі), то елемент ТК з номером і можна розрахувати окремо від решти елементів (це – 1,6).

Рядки матриці  $S$ , які мають крім елемента  $S_{ij}$  інші ненульові елементи – *комплекси*. Ненульові елементи показують вершини графа, які входять в комплекс.

В прикладі в склад ТК входять два комплекси:

комплекс 1: - 2, 3, 4, 5, 9

комплекс 2: - 7, 8.

Наведений алгоритм потребує багато ручної праці.

*Ще один алгоритм.* Розглядаються будь-які три вершини графа ТК –  $i, j, m$ . Якщо існує шлях (будь якої довжини!) з вершини  $i$  в вершину  $j$  і з  $j$  в  $i$ , то ці вершини належать одному комплексу  $k$ . Для приєднання вершини  $m$  до комплексу необхідно проаналізувати: чи є шлях з будь-якої вершини комплексу (наприклад,  $i$ ), у вершину  $m$  та зворотній шлях з вершини  $m$  в будь-яку вершину комплексу  $k$  (наприклад,  $i$ ). Якщо ці два шляхи існують, то вершина  $m$  належить комплексу  $k$ .

Для наведеного вище прикладу виділяються комплекси:

$k_1$  (вироджений): - елемент 1

$k_2$ : 2, 3, 4, 5, 9

$k_3$  (вироджений): елемент 6

$k_4$  : 7,8

### **2.3. Структурний аналіз об'єкта**

Для складного об'єкта, зокрема промислового підприємства виконуються дві основні процедури:

- цільова декомпозиція за визначеними напрямками;
- формування структури (потрібної) з виділених структурних елементів

Умовно структурна схема об'єкта представляється як результат декомпозиції за трьома напрямками.

Результатом декомпозиції складної системи є:

$$S_{i,m,j,k}^{s,l,e} = S_i^s \text{ I } S_m^l \text{ I } S_{jk}^e, \quad (2.14)$$

$S_i^s$  - сукупність елементів і-тої функціональної сфери підприємства (*страта*);

$S_m^l$  - сукупність елементів контура управління, який забезпечує m-рівень (*шар* – слой) складності приймаємих рішень;

$S_{jk}^e$  - сукупність елементів організаційної структури k-того підрозділу j-того рівня управління (*ешелон*).

Для кожного елементу трьохвимірного простору декомпозиції при визначеній меті управління справедлива умова:

$$S_{i,m,j,k}^{s,l,e} = \begin{cases} 1, \text{ якщо існує для елемента задача управління яка реалізує частинну мету} \\ 0, \text{ в протилежному випадку} \end{cases} \quad (2.15)$$

Такий підхід дозволяє виділити всі структурні елементи об'єкта, які беруть участь в реалізації заданої цільової функції, та розглянути доцільність охоплення цих структурних елементів створюваною системою управління (з урахуванням можливості формалізації задач управління, наочності засобів спряження з об'єктом і т.д.).

**Стратифікація об'єкта управління.** В складі підприємства можна виділити такі основні функціональні сфери (*страти*):

1. Техніко-економічне планування ( $S_1^s$ )

2. Кадри	$(S_2^s)$
3. Праця та зарплата	$(S_3^s)$
4. Фінанси	$(S_4^s)$
5. Матеріально-технічне постачання	$(S_5^s)$
6. Реалізація (збут) продукції	$(S_6^s)$
7. Реконструкція та реінжинірінг	$(S_7^s)$
8. Виробництво	$(S_8^s)$

Тоді загальна мета управління записується як об'єднання

$$Q = \bigvee_{i=1}^8 Q_i, \quad (2.16)$$

тобто реалізується кожною функціональною сферою  $S_i^s$ .

При такій декомпозиції може виявитися, що ряд страт не бере участі у досягненні поставленої мети, тобто не має значення для майбутньої системи управління. Але для досягнення такої мети як *тах* прибутку (або *мін* собівартості), необхідним є охоплення системою управління всіх структурних елементів об'єкта, які приймають участь в формуванні прибутку (собівартості) – необхідна *інтегрована система*.

А такі показники як *мін* витрат, *тах* випуску продукції, зниження витрат енергії досягаються (формується) саме в результаті управління сферою  $S_8^s$ .

**Декомпозиція за рівнями складності приймаємих рішень.**  
Головна трудність та особливість тут:

- складна система вимагає оперативних рішень в реальному часі;
- складність ситуації потребує значного часу для аналізу та формування стратегії поведінки.

Вихід – багатошарова ієрархія системи прийняття рішень для управління складним об'єктом. Проблема розбивається на підпроблеми так, щоб розв'язання сукупності підпроблем приводило до розв'язання проблеми в цілому.

Можна виділити такі шари (*слои*) за складністю приймаємих рішень:

$S_1^I$  - регулювання, контроль для окремих технологічних агрегатів (нижній рівень);

$S_2^I$  - координація першого рівня в межах технологічної підсистеми на рівні  $S_1^I$ ;

$S_3^I$  - координація другого рівня: управління вищої підсистеми для узгодження локальних цілей нижніх підсистем в межах (цеху, відділення, дільниці...);

$S_4^I$  - координація третього рівня – узгодження цілей між цехами, дільницями, відділеннями;

$S_5^I$  - координація четвертого рівня для узгодження цілей між окремими виробництвами (заводами) в межах підприємства

**Декомпозиція за організаційною ознакою.** Організаційна структура підприємства відображає розподілення процесів у функціональних сферах (стратах) між її елементами. Для кожної

страти можна поставити у відповідність своє число рівнів прийняття рішень і своє число елементів, а число підсистем в кожному елементі залежить від обраного критерія декомпозиції.

Число підсистем в першому ешелоні  $S_{1k}^l$  визначається результатом декомпозиції процесу на самостійні елементарні оператори типу “вхід–вихід”. Це приводить до великої кількості підсистем контролю і управління на локальному рівні.

На наступному рівні управління  $S_{2k}^l$  число підсистем залежить від топології виробничого та технологічного комплексів та параметричності зв'язків між операторами процесу.

Аналогічно можна виділити число підсистем в третьому та четвертому ешелонах  $S_{3k}^l$ ;  $S_{4k}^l$ .

Число підсистем  $k$  в ешелоні  $j$ -го рівня визначається лише ретельним обстеженням (дослідженням) кожного об'єкта.

Функціональна структура описується графом:

$$W(F,U) \quad (2-17)$$

$F$  – функції ,

$U$  – інформаційні зв'язки між ними.

Зв'язок між ТОУ та СУ можна визначити за допомогою певних процедур:

$$\bar{\Gamma}(\bar{M}, \bar{A}) \xrightarrow{R_5} W(F,U) \xrightarrow{R_6} G(V,B) \quad (2.18)$$

де:  $\bar{\Gamma}(\bar{M}, \bar{A})$  – конденсація орграфу структури ТОУ;

$M$  – множина технологічних елементів,

$A$  – множина зв'язків між ними;  
 $G(V,B)$  – оргграф технічної структури СУ;  
 $V$  – функціональні елементи (множина);  
 $B$  – множина зв'язків між ними.

## 2.4. Моделювання технічної структури ССУ

Таку модель можна отримати, якщо використовувати орієнтовані графи, тоді граф технічної структури записується як  $G(V,B)$ , де  $V$  – множина функціональних елементів  $V_i \in V$ ,  $B$  – множина зв'язків між ними,  $B_i \in B$ . Тоді для кожної підсистеми можна записати, що  $G_i(V_i,B_i)$  – оргграфи технічної структури. При перетвореннях використовують такі операції на орієнтованих графах:

якщо задано

$$G_1(V_1,B_1) \text{ і } G_2(V_2,B_2), \quad (2.19)$$

то їх об'єднанням буде

$$G_1(V_1,B_1) \Theta G_2(V_2,B_2) = G_3(V_3,B_3) \quad (2.20)$$

при цьому:

$$V_3 = V_1 \Theta V_2, B_3 = B_1 \Theta B_2 \quad (2.21)$$

операція перетину:

$$G_1(V_1,B_1) \text{ I } G_2(V_2,B_2) = G_3(V_3,B_3) \quad (2.22)$$

$$V_3 = V_1 \text{ I } V_2, B_3 = B_1 \text{ I } B_2 \quad (2.23)$$

різниця орієнтованих графів:

$$G_1(V_1,B_1) \setminus G_2(V_2,B_2) = G_3(V_3,B_3) \quad (2.24)$$

$$V_3 = V_1 \setminus V_2, B_3 = B_1 \setminus B_2 \quad (2.25)$$

Для автоматизованих ТК при описі технічної структури необхідно включити також множину технологічних елементів, тобто технологічного обладнання. Тоді орієнтований граф технічної структури АТК буде подаватись

$$O(I,Q)=\Gamma(M,A) \Theta G(V,B),$$

$$(2.26)$$

де  $\Gamma(M,A)$  орієнтований граф технологічного об'єкта управління. При цьому  $M$  – множина технологічних об'єктів,  $A$  – зв'язки між ними  $G(V,B)$  – оргграф системи управління. При цьому необхідно враховувати, що перетин графів

$$\Gamma(M,A) \cap G(V,B) = \emptyset \quad (2.27)$$

не пуста множина.

**Графові моделі технічної структури складної системи управління.** Якщо система реалізує множину функцій  $F=\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ , то кожен з функцій можна представити як відображення в підсистемі за  $h$  маршрутами  $\{M : (x; y) \mid i = 1, \dots, h\}$  ( $M$  – множина технологічних елементів в ТК) показників вхідної інформації в показники вихідної ( $x \in X_j \subset X$  – модулі – джерела інформації про об'єкт,  $y \in Y_j \subset Y$  – модулі приймачі інформації,

$j=1, \dots, m$ . Тоді модель функціональної підсистеми:

$$G_j(V_j, B_j) = U_h M_i(X, Y) \quad (2.28)$$

$$U_h M_i(X, Y) \neq \emptyset, \quad i=1, \dots, h; \quad j=1, \dots, m, \quad x \in X_j, \quad y \in Y_j \quad (2.29)$$

Структура вузла управління системи – сукупність функціональних елементів  $V_j$  та зв'язків між ними  $B_j$ , а спосіб їх організації диктується реалізуємою підсистемою функціями і цілями.



Вузол управління реалізує  $q$  ( $q \in m$ ,  $q \geq 1$ ) функцій із заданими показниками якості.

Будь-яка система чи підсистеми формалізована моделями “вхід-вихід” – розв’язувальна система. Тоді завжди є розв’язувальні елементи. В першому наближенні число вузлів управління  $\rho$  визначає степінь розподіленості ТС системи.

Модель вузла управління (його ТС):

$$G_{\rho}(V_{\rho}, B_{\rho}) = \prod_q G_j(V_j, B_j) = \prod_q \prod_h M_{ij}(x, y)$$

$$\bigcap_{\rho} G_j(V_j, B_j) = \bigcap_q \bigcap_h M_{ij}(x, y) \neq \emptyset; j=1, \dots, q; i=1, \dots, h \quad (2.30)$$

$$q \in m; x \in X_j; y \in Y_j; V_{\rho} = \prod_q V_j; B_{\rho} = \prod_q B_j$$

Тоді модель ТС системи управління:

$$G(V, B) = \prod_{\rho} G_{\rho}(V_{\rho}, B_{\rho}) = \prod_{\rho} \prod_q G_j(V_{j\rho}, B_{j\rho}) = \prod_{\rho} \prod_q \prod_h M_{ij\rho}(x, y);$$

$$\bigcap_{\rho} G_{\rho}(V_{\rho}, B_{\rho}) = \bigcap_{\rho} \bigcap_q \bigcap_h M_{ij\rho}(x, y) \neq \emptyset, \quad V = \prod_{\rho} V_{\rho} = \prod_{\rho} \prod_q V_{j\rho}; \quad B = \prod_{\rho} B_{\rho} = \prod_{\rho} \prod_q B_{j\rho}; \quad (2.31)$$

$$i=1, \dots, h; j=1, \dots, q; \rho=1, \dots, \rho, q \in m$$

$\rho$ - число вузлів управління;

$q$  – кількість реалізуємих підсистемою функцій із заданими показниками якості;

$h$  – маршрути перетворення вхідної інформації у вихідну;

$m$  – кількість функцій системи.

Наведені моделі:

- наочні, добре відображають конфігурацію системи та зв'язки між елементами і їх групами;

- при відомій важливості окремих елементів можна визначити значення показників якості системи з урахуванням способів з'єднання елементів;
- дозволяють перетворити графові представлення в матричні еквіваленти (матриці суміжності, дистанційні матриці...);
- в той же час ці моделі громіздкі і не завжди зручні.

## 2.5. Декомпозиція технічної структури складних систем управління

Коли створюється розподілена СУ, то розв'язуються задачі:

- визначається оптимальна кількість вузлів управління та їх розташування;
- розподіляються функції управління між підсистемами ТК та вузлами управління так, щоб вартість технічних засобів, завантаження вузлів не перевищували заданих значень;
- встановлюються зв'язки між вузлами управління, виходячи з показників живучості;

Орграф  $G(V, B)$  для централізованої СУ аналізується з метою визначення доцільності розподіленої системи. Кожній вершині  $v \in V$  приписується вага, яка відповідає вартості функціонального пристрою

$\{S_i^T \mid i=1, \dots, \omega\}$ , а кожній дузі  $v \in B$  – вага, яка дорівнює довжині відповідної лінії зв'язку  $\{\lambda(ij) \mid ij \in I\}$ ,  $I$  та  $\Omega$  - множини індексів вершин та дуг в орграфі  $G(V, B)$ , а  $\lambda(ij)$  не перевищує деякого значення  $\lambda(ij)_{\text{доп}}$ .

Допустимо, що на об'єкті виділено  $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_p\}$  місць, де можна розмістити вузли управління системи. Тоді задача декомпозиції полягає в розбитті орграфа  $G(V, B)$  на  $p$  підграфів  $\{G_i(V_i, B_i) \mid i=1, \dots, p\}$

таким чином, щоб сума ваг всіх дуг в новому орграфі  $\Phi(\bar{V}, \bar{B})$  була мінімальною, а сума ваг вершин  $S^T \leq S_{дон}^T$ . При цьому завантаження (пропускна спроможність) елемента  $q \in V, B$  не повинна перевищувати максимального значення  $R_q \leq R_{q\max}$ , а показник живучості  $\nu \geq \nu_{дон}$ . Під живучістю розуміють чутливість структури системи до пошкоджень. Це можна оцінити як мінімальну кількість  $\nu$  вершин, видалення яких руйнує всі шляхи в орграфі  $G(V, B)$  і робить систему непрацездатною.

Декомпозиція орграфа  $G(V, B)$  зводиться до задачі лінійного призначення:

$$\min L = \min \sum_{ij \in I} L(ij), \quad (2.32)$$

$$\rho \geq 2; \quad S^T \leq S_{дон}^T, \quad \lambda(ij) \leq \lambda(ij)_{дон}, \quad \nu \geq \nu_{дон}, \quad R_q \leq R_{q\max}, \quad q \in V, B.$$

$S$  – вартість функціонального пристрою;

$\nu$  - показник живучості;

$R$  – завантаження елементами;

$\rho$  - число вузлів управління.

[1, с.35-52, 3, с.39-56]

### Контрольні питання

1. Призначення структурного аналізу складних систем
2. Дайте визначення функціональної, технічної та організаційної структур складних систем
3. Основні поняття теорії графів
4. Матричне представлення графів
5. Множинне представлення графів
6. Наведіть приклад орієнтованого графа системи
7. В чому полягає впорядкування графових моделей?

8. Що таке числові функції на графах?
9. Як здійснюється виділення комплексів на графових моделях?
10. Наведіть приклад структурного аналізу об'єкта на прикладі підприємства
11. Наведіть приклад моделювання технічної структури складної системи управління
12. В чому полягає декомпозиція складної системи управління?

### **3. Системний аналіз процесу управління в складних системах**

#### **3.1. Системний аналіз багаторівневих ієрархічних структур**

Сучасний етап розвитку автоматизації виробництва характеризується впровадженням складних систем управління, які реалізуються за допомогою багаторівневих ієрархічних структур на основі комп'ютерних мереж різного рівня та призначення. В основі розробки таких структур лежить поняття ієрархії підзадач (функцій), які розв'язуються системою, із своїми об'єктами та критеріями. Ця ієрархія відображається в ієрархії математичних моделей з відповідними обмеженнями та ієрархії технічних засобів. Ієрархічні структури (системи) управління мають такі суттєві характеристики:

- послідовне вертикальне розташування підсистем, які складають систему (вертикальна декомпозиція);
- пріоритет дій або права втручання підсистем верхнього рівня;
- залежність дій підсистем верхнього рівня від фактичного виконання нижніми рівнями своїх функцій.

Названі особливості потребують спеціальних підходів до математичного опису процесу функціонування складної системи управління, на основі якої можна було б виявити залежності показників ефективності від параметрів системи і зовнішнього середовища, її структури та алгоритмів взаємодії елементів. Крім того, математичні моделі дають можливість розв'язати головну системотехнічну задачу – синтез оптимальної структури. Це можливо лише на основі багаторівневого ієрархічного опису із застосуванням різних формальних мов, що дає можливість подати досліджувану систему як елемент (підсистему) більш широкої системи: розглядати її як єдине ціле; визначити структуру з необхідним ступенем деталізації. Для можливості забезпечення потрібної точності та зручності, урахування багатьох характеристик системи використовують різні рівні опису. Перший рівень відповідає інформаційному опису, тобто розглядаються інформаційні зв'язки системи із зовнішнім середовищем та її роль в отриманні та переробці інформації. Другий рівень виявляє множину функціональних елементів та відносини між ними. Третій рівень – системотехнічний опис, що дає можливість визначити технічну структуру системи із відповідними засобами.

Багаторівневий опис системи має ряд загальних властивостей:

- вибір рівня опису залежить від мети дослідження, розробка моделей на різних рівнях може проводитись паралельно, незалежно;
- вимоги до умов роботи підсистем верхнього рівня виступають як обмеження підсистем нижнього рівня;
- на нижніх рівнях опису виконується найбільша деталізація, але призначення і зміст системи розкриваються на верхніх рівнях.

При функціонуванні складної системи управління виникає ряд особливостей, пов'язаних із взаємодією підсистем:

- на верхньому рівні функціонують більш крупні підсистеми, що визначає більш широкі аспекти поведінки системи в цілому. Підсистема верхнього рівня є “командною” по відношенню до інших та координує роботу підсистем нижнього рівня;
- період прийняття рішень на верхньому рівні завжди більший, ніж на нижніх. При цьому необхідно враховувати таку обставину: сигнали з верхнього рівня не можуть поступати частіше, ніж інформація від нижніх, тому що в іншому випадку координації нижніх підсистем не буде;
- підсистема верхнього рівня завжди має справу з більш повільними аспектами поведінки усієї системи, вона завжди очікує результати реакції підсистем нижніх рівнів, наприклад реакцію підсистем різних рівнів можна розбити за частотою діючих збурень;
- на верхніх рівнях опис та проблеми менш структуровані, мають більше невизначеностей, більш складні для формалізації. Таким чином, проблеми прийняття рішень на верхніх рівнях більш складні.

Функціональні структури складних систем управління включають ряд задач (підзадач), розташованих на різних рівнях ієрархії: стабілізація технологічних режимів технологічних агрегатів, автоматичне регулювання технологічних змінних, програмно-логічне управління, блокування, сигналізація; оптимізація технологічних режимів; координація функціонування підсистем; прийняття рішень в умовах невизначеності за допомогою інтелектуальних підсистем підтримки прийняття рішень, в тому числі експертних систем.

Основні задачі управління розглядаються та використовуються як на стадії проектування, так і в період експлуатації.

*На стадії проектування розв'язуються задачі:*

синтеза структури, вибору технічних засобів, алгоритмічного, інформаційного, програмного і технічного забезпечення на всіх рівнях ієрархії;

декомпозиція об'єктів та задач управління;

оцінка економічної ефективності алгоритмів управління.

До задач управління *на стадії експлуатації* відносять в першу чергу аналіз збурень: їх амплітуда, частотний спектр, період виникнення суттєво впливають на сукупність задач управління:

отримання та первинна обробка інформації;

регулювання та програмно-логічне управління;

оптимізація режимів;

координація роботи підсистем;

оперативне управління.

### **3.2. Класи задач та види управління**

При визначенні видів та принципів управління враховуються дві основні вимоги:

мета управління та його вид повинні узгоджуватись з видом бажаного функціонування об'єкта (з метою функціонування);

принципи управління та значення управляючих діянь повинні узгоджуватись з властивостями об'єкта.

Не дивлячись на величезну різноманітність фізичних принципів функціонування та призначення технічних об'єктів, класи задач управління обмежені:

1. *Задача забезпечення заданного характеру зміни координат чи деяких функцій від них об'єкта управління* – автоматизація ТП.

2. *Задачі корекції динамічних властивостей ОУ*, наприклад:

переведення з природнього нестійкого процесу в ОУ в стійкий;  
переведення коливальних процесів в аперіодичні і т.д.

Часто – для пересування об'єктів, зокрема літальних апаратів.

3. *Задачі компенсації збурень* (зовнішніх та внутрішніх) з метою збереження бажаного характеру функціонування ОУ:

*підзадачі компенсації збурень*, які викликають відхилення координат стану (координатні). В рівняннях динаміки – це додаткові члени в правій частині;

*підзадачі компенсації збурень*, які приводять до небажаних змін динамічних властивостей (*параметричні збурення*) – параметрів тепло- та масопередачі і т.д. В диференційних рівняннях – змінні, або коефіцієнти, які залежать від часу або координат інших процесів;

*підзадачі компенсації збурень*, які приводять до небажаних змін структури об'єктів (*структурні*). Це може бути: зміна працездатності елементів; порушення зв'язків між елементами (порушення цілістності) Ці структурні збурення можуть бути *внутрішніми* (дефекти об'єкта чи його елементів; еволюція властивостей ОУ) та *зовнішніми* (збурення, які виходять за рамки технічних умов експлуатації).

Внутрішні збурення та їх вплив – предмет досліджень теорії надійності, для зовнішніх – теорії живучості.

4. *Задачі координації взаємодії підсистем*

Для чотирьох основних класів задач організуються такі види управління:



*координатне*, управляючі дії якого - зміни фізичних потоків, обмеження області допустимих значень координат або показників якості процесів в ОУ;

*параметричне*, управляючі дії якого – зміни значень фізичних параметрів елементів об'єкта;

*структурне*, управляючі дії якого – зміни складу елементів та (чи) зв'язків між ними та режимів функціонування.

Для ТК С – комбінації видів управління.

### **3.3. Типові функціональні структури систем управління**

Об'єм задач управління та необхідні його види однозначно визначаються внутрішніми властивостями об'єкта, його структурою та необхідними показниками функціонування. Для ТК формування функціональної структури системи управління має особливе значення.

*Функціональна структура* – сукупність функцій системи, як сукупність операцій (дій), які забезпечують досягнення частинних цілей (результатів) функціонування системи.

Для організації процесу управління будь-якого виду реалізується деякий універсальний набір функцій, що складають типову функціональну структуру. Це такі функції:

*інформаційні* – вимірювання, збір, сортування, узагальнення та розподіл даних про стан ОУ;

*програмування режимів управління* – перетворення зовнішніх завдань, наприклад від системи вищого рівня, в сукупність установок для підсистем, обмежень області станів, показників якості управління, програм зміни управлінь;

*вироблення управляючих діянь* – сукупність операцій (дій), які визначають значення параметрів управляючих дій на основі вихідних даних реалізації інформаційної функції та функції програмування режимів управління;

*реалізації управляючих дій* – реалізує результати попередньої функції у фізичні управління на об'єкт.

*Для структурного управління* виділяють свої функції:

*технічного діагностування* – це специфічна інформаційна функція, яка передбачає контроль зміни технічного стану, пошук місця зміни цього стану, оцінка глибини (об'єму) зміни стану об'єкта діагностування.

При накопиченні відхилень від норми експлуатаційних параметрів об'єкта структурного управління реалізуються свої функції:

*реконфігурації структури об'єкта* – оцінка стану попередньою функцією, пошук допустимої структури об'єкта на виділених варіантах, визначення кращого варіанту, зміна зв'язків та режимів функціонування елементів системи, контроль результатів впливу на структуру об'єкта;

*аварійного захисту*: оцінка типу відмови в об'єкті (проста чи аварійна), а коли аварійна – локалізація області її впливу на працездатні елементи системи, переведення об'єкта за допомогою реконфігурації структури в один з працездатних станів або в такий, що відповідає простим відмовам;

*управління резервами* – виявлення за даними функції технічного діагностування порушень працездатності елемента об'єкта, включення резервних елементів, контроль результатів заміни елементів;

*технічного обслуговування і ремонту* – виявлення за даними функції технічного діагностування об'єму та змісту відновлювальних робіт, режиму функціонування об'єкта, проведення операцій обслуговування та ремонту, контроль якості відновлювальних робіт.

*Реалізація функцій структурного управління* має свої особливості:

реалізація функцій резервування, автоматичної реконфігурації, технічного діагностування виконується *децентралізовано*, тобто ці функції поєднуються та часто конструктивно об'єднуються з технічними засобами (а часом і програмними) функцій координатного та параметричного управлінь;

в процесі розробки системи управління функції структурного управління повинні розроблятися так, щоб забезпечити і розв'язання системних питань: - глибина охоплення, ефективність, уніфікація способів та засобів реалізації і інш.

Самі контури структурного управління повинні певним чином взаємодіяти між собою: так контур реконфігурації структури доцільно включати після того, як вичерпані передбачені резерви, а контури ремонту і технічного обслуговування не лише за інформацією від технічного діагностування, а й від контурів управління резервами, реконфігурації, аварійного захисту і т.д.

**Функціональні структури координатного та параметричного управлінь.** Ці структури розглядаються разом тому, що:

способи компенсації збурень на координати певною мірою забезпечують компенсацію і параметричних збурень;

ці контури разом з ОУ виступають як об'єкт управління для контура структурного управління.

Варіанти функціональних структур обираються за двома факторами:

- *видом цілі (задачі) управління,*
- *способом компенсації збурень*

### ***А. Вид цілі, мети (задачі) управління***

#### ***А1. Системи стабілізації. Мета***

$$X_{зд} - X(t) \rightarrow 0 ; \quad x_{зд} = \text{const} \quad (3.1)$$

Використовуються різні критерії якості, а загальним

$$I \leq I_{зад}, \quad \forall t \in (t_0, t_1)$$

Тут же: зміна завдання від  $x_{зд1}$  до  $x_{зд2}$

$x_{зд}$ ,  $X(t)$  – відповідно задане та поточне значення регульованої координати

#### ***А2. Системи програмного за виходами управління***

$x_{зд} \rightarrow \text{var}$  при наперед заданих функціях часу

Тут є два підкласи:

А2.1. Системи часового програмного за виходами управління, коли  $x_{зд}(t)$  жорстко визначається за часом;

А2.2. Системи координатного програмного за виходами управління, коли  $x_{зд}(t)$  визначаються рівнем значень деяких координат системи вищого рангу, а значення моментів часу зміни довільні.

### **A3. Системи слідкуючого управління**

$x(t) \rightarrow x_{зд}(t), \forall t \in (t_0, t_1), x_{зд} = \text{var}$  – функція довільного вигляду, наперед не відома. Показники якості слідкування визначаються, як правило, значеннями не тільки  $x(t)$ , а й їх похідних

Для підвищення точності слідкування необхідно мати якомога більшу інформацію стосовно функції  $x_{зд}(t)$ .

### **A4. Системи екстремального управління**

Мета: показник якості функціонування

$$I(x(\infty), z), z - \text{збурення}$$

утримується в заданій області наближення до наперед невідомого і змінюваного в області змінних  $x$ ,  $x_{зд}$  екстремальному значенню.

$$I(\dots) \rightarrow \text{extr},$$

$$\text{при обмеженнях: } x(t) \in \Omega_x \dots$$

Критерії  $I$  обираються, звичайно, індивідуально для кожного об'єкта, але часто це – *втрати на переміщення* в області екстремума (“рыскание”)  $\Delta I = |I - I_{\text{opt}}|$  та *швидкодія*, тобто час перевodu режиму функціонування в стан, близький до  $I_{\text{opt}}$ .

При екстремальному управлінні використовуються також системи класів A2 та A3 для забезпечення якості перехідних процесів.

Часто використовується  $\text{extr}$  статичної характеристики.

### **A5. Системи оптимального управління**

Мета: на протязі часу  $\Delta t = t_1 - t_2$  функціонування об'єкта забезпечити екстремум функціонала:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F(X, U, Z) dt \rightarrow \text{extr} \quad (3.2)$$

в межах допустимих змін параметрів та при існуючих моделях.

Часто ставиться задача: перевести координати об'єкта зі стану  $x(t_0)$  в стан  $x(t_k)$  при  $I \rightarrow \text{extr}$ , що відповідає певній траєкторії та  $U$ .

#### **А6. Термінальні системи управління**

Мета: перевести об'єкт в заданий кінцевий стан  $x(t_k)$  чи в задану область в призначений чи довільний час  $t=(t_k)$ .

Показник якості формується в залежності від обмежень на траєкторію руху, збурень та прогнозованих  $x(t)$ , це:

промах  $I=|x(t_k) - x_{зд}|$ ;

ризик  $I=M\{\Psi(I)\}$ ,  $M$  - математичне сподівання заданої функції  $\Psi$  втрат в кінцевому (термінальному) стані;

квадратичний показник:

$$I=M\{(x(t_k) - x_{зд})^2\} \quad (3.3)$$

Ці системи можна розглядати як підклас систем оптимального управління, але за постановкою та спеціальними методами синтезу доцільно виділяти їх в окремий клас.

### **Б. Способи компенсації збурень**

#### **Б1. Способи компенсації координатних збурень**

##### **Б1.1. Системи управління за збуренням**

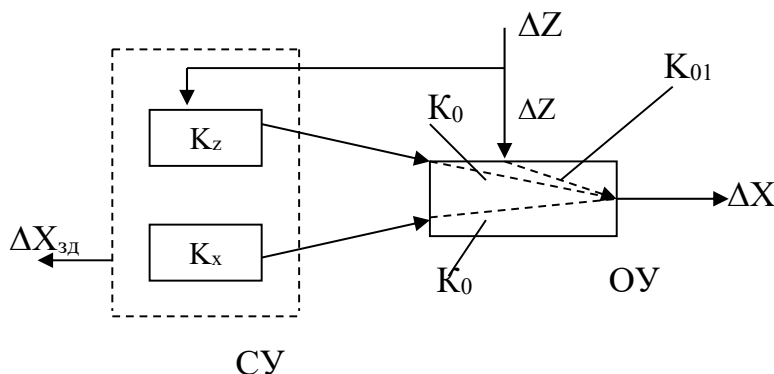


Рис.3.2. Структура системи управління за збуренням

Організовується штучний канал  $\Delta Z \rightarrow \Delta X$  по кожному збуренню  $Z_i$  для його компенсації. Значення параметрів операторів управляючого пристрою  $K_x$ ,  $K_z$ , знаходять з умови компенсації, тобто

$$\Delta X = \Delta X_{зд},$$

тоді:

$$\Delta X = \Delta X_{зд} \cdot K_x \cdot K_0 + \Delta Z \cdot K_z \cdot K_0 + \Delta Z \cdot K_{01}, \quad (3.4)$$

$$\text{де: } K_x = 1 / K_0; \quad K_z = - K_{01} / K_0$$

Підставивши маємо:

$$\Delta X = \Delta X_{зд} \cdot 1 / K_0 \cdot K_0 + \Delta Z \cdot (- K_{01} / K_0) \cdot K_0 + \Delta Z \cdot K_{01}, \quad (3.5)$$

тобто

$$\underline{\Delta X = \Delta X_{зд}}$$

В цьому способі:

В залежності від значення  $K_z$  можна отримати різний ступінь компенсації  $\Delta Z$ , або навіть перекомпенсацію;

при будь-яких значеннях  $K_x$ ,  $K_z$  зберігається стійкість системи (при стійкому об'єкті).

Обмеження: спосіб застосовується при повільно змінюваних  $Z$ ;

для компенсації  $Z$  його необхідно вимірювати;

для досягнення  $\Delta X \approx \Delta X_{зд}$  необхідно забезпечити стабільність параметрів  $K_x$ ,  $K_z$ , які залежать від параметрів об'єкта.

### Б1.2. Системи управління за відхиленням

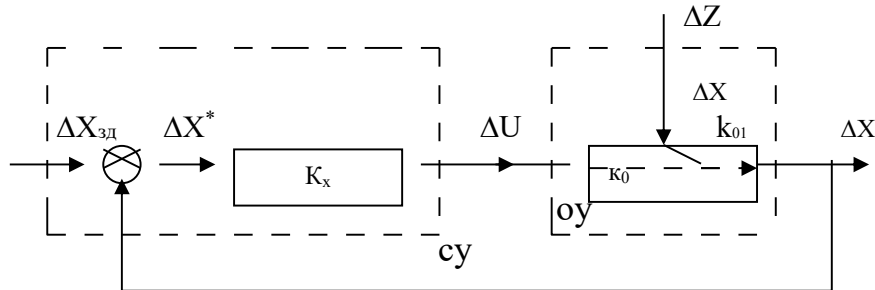


Рис.3.3. Структура системи управління за відхиленням

Значення  $\Delta X$  та  $\Delta X_{зд}$  порівнюються неперервно або з деякою циклічністю. При цьому:

$$\begin{aligned}\Delta X &= K_0 \Delta U - K_{01} \Delta Z, \\ \Delta U &= K_x \cdot \Delta X^* \\ \Delta X^* &= \Delta X_{зд} - \Delta X\end{aligned}\tag{3.6}$$

або:

$$\Delta X = \frac{K_0 K_x}{1 + K_0 K_x} \Delta X_{зд} - \frac{K_{01}}{1 + K_0 K_x} \Delta Z\tag{3.7}$$

Похибка управління, викликана дією збурення:

$$\delta X = \frac{K_{01}}{1 + K_0 K_x} \Delta Z\tag{3.8}$$

Повна компенсація можлива при  $K_x \rightarrow \infty$ , або компенсація тим повніша, чим “сильніша” нерівність

$$1 + K_0 K_x > K_{01}\tag{3.9}$$

Методична похибка викликана тим, що



$$\frac{K_0 K_x}{1 + K_0 K_x} \pi 1 \quad (3.10)$$

при кінцевих значеннях  $K_0$ ,  $K_x$ , тобто мета управління досягається з тим більшою точністю, чим “сильніша” нерівність

$$K_0 K_x > 1, \quad K_0 K_x > K_{01} \quad (3.11)$$

Переваги: немає потреби у вимірюванні  $\Delta Z$ ;

частково компенсуються збурення на параметри системи  $K_0$ ,  $K_{01}$ ,  $K_x$ , цей ефект тим більший, чим більший добуток  $K_0 \cdot K_x$

Обмеження у застосуванні:

при збільшенні значення коефіцієнта підсилення  $K_x$  при наявності диференційних операторів  $K_0$ ,  $K_{01}$ ,  $K_x$  підвищення ступеню компенсації збурень обмежується вимогами стійкості, тому завжди є проблема: статична точність – стійкість.

Зауваження:

1. Викладені співвідношення відносяться до статичних систем. При наявності в контурі управління інтегруючої ланки повна компенсація забезпечується при кінцевих значеннях  $K_0$ ,  $K_x$ , але проблема стійкості усувається.

1. При багатоємкісних об'єктах, коли збурення діють на різні ємкості (а також в ТК) затосування одного контура вимагає ускладнення оператора  $K_x$  або компенсація взагалі неможлива. Часто використовуються каскадні структури, які здійснюють роздільну компенсацію.

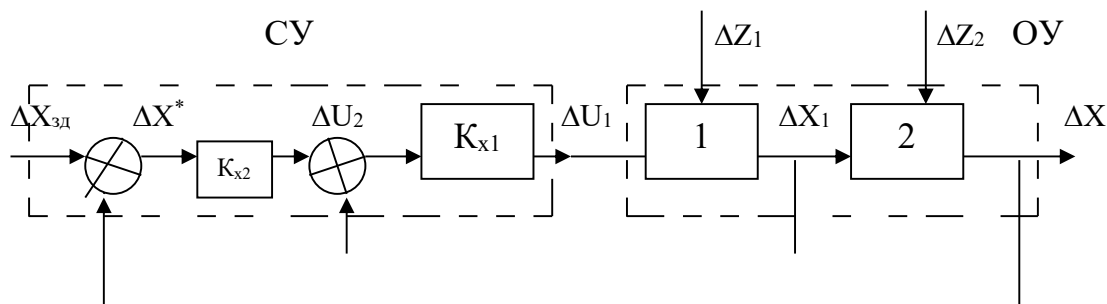


Рис.3.4. Структура системи каскадного управління

Структура каскадної системи більш складна, але оператори  $K_x$  більш прості. Перший контур основний, другий – по  $X_1$  – допоміжний, який настраюється на компенсацію  $\Delta Z$

### Б1.3. Комбіновані системи

Спосіб компенсації – поєднання класів Б1.1 та Б1.2.

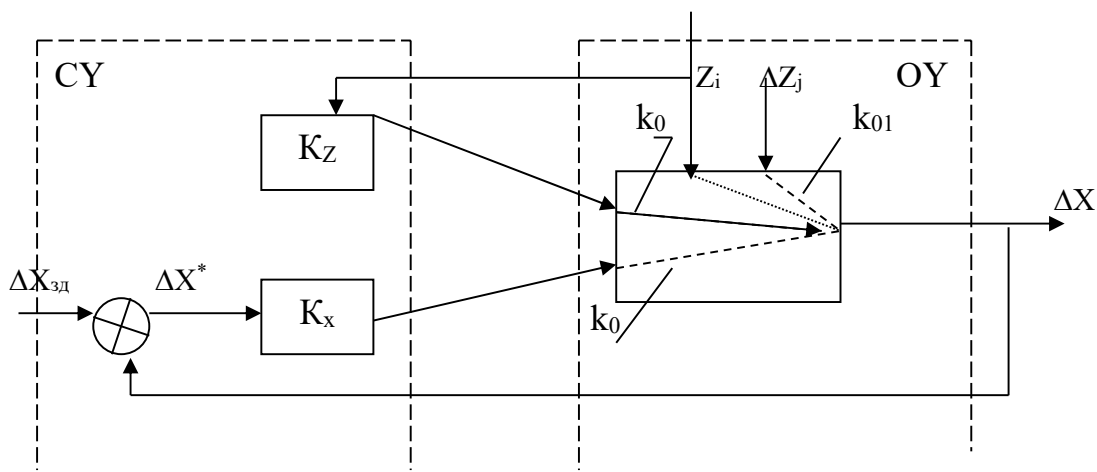


Рис.3.5. Структура системи комбінованого управління

$$\Delta X = \frac{K_0 K_x}{1 + K_0 K_x} \Delta X_{зд} - \frac{K_{01} - K_0 K_z}{1 + K_0 K_x} \Delta Z \quad (3.12)$$

Тоді для компенсації  $\Delta Z$  необхідно:

$$K_{01} - K_0 K_z = 0, \quad (3.13)$$

тобто при кінцевих значеннях коефіцієнтів.

Переваги: проблема статична точність – стійкість розв'язується простіше;

частково компенсується дрейф значень коефіцієнтів  $K_x, K_z, K_0, K_{01}$

Зауваження: контур за збуренням  $\Delta Z \rightarrow \Delta X$  використовується для найбільш сильно діючого збурення  $\Delta Z_i$ , а зворотній зв'язок – для решти збурень в системі. Канал  $\Delta Z_i \rightarrow \Delta X$  значно підвищує швидкість та точність.

## ***Б2. Системи з компенсацією координатних та параметричних збурень***

Ці системи – для нестационарних об'єктів, або об'єктів з невідомими характеристиками. Тоді принципи управління, які визначають функціональну структуру системи, можна класифікувати так:

- за ступенем нестационарності динамічних властивостей об'єкта;
- за способом завдання бажаного функціонування;
- за способом компенсації впливу нестационарності об'єкта.

*Загальним для цих класів систем – властивість адаптації за рахунок:*

- вибору величини і частоти корекцій управляючих діянь на основі рекурентних алгоритмів обробки наявної інформації про хід процесів в об'єкті;
- зміни динамічних властивостей (параметрів) системи заданої структури (системи із самонастройкою);
- комутацією структури та режимів роботи системи (системи із змінною структурою).

### ***Б2.1. Системи координатно-параметричного управління***

Системи із самонастройкою використовують в тих випадках, коли степінь нестационарності динамічних характеристик ОУ є суттєвою, і її не вдається компенсувати ні зміною параметрів, ні додатковими діями.

Використовується два способи:

- організація прямого діяння від прямо чи непрямо (косвенно) вимірюваних нестационарних параметрів динамічних характеристик ОУ на змінювані координати ОУ;
- організація контура компенсації із зворотними зв'язками по вимірювальним нестационарним динамічним властивостям об'єкта

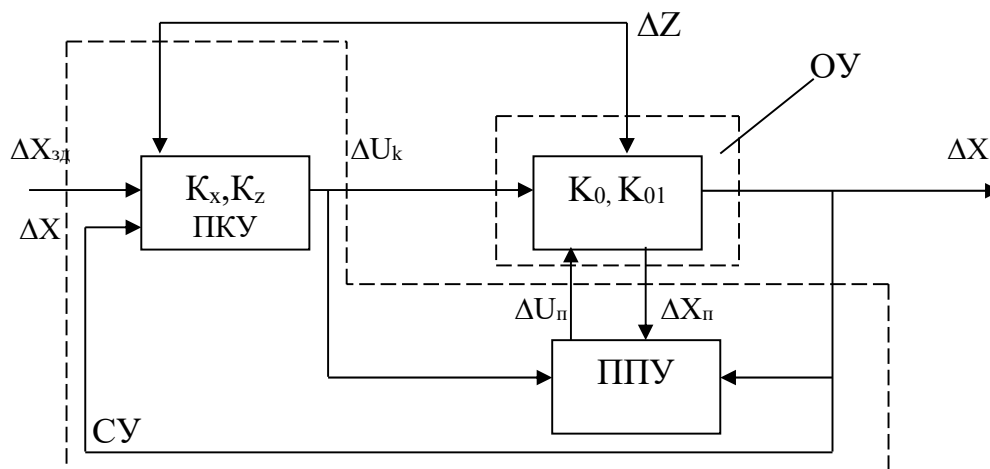


Рис.3.6. Структура системи координатно-параметричного управління

ППУ – пристрій параметричного управління;

ПКУ – пристрій координатного управління.

СУ – система управління

Основна проблема при створенні – оптимальне сполучення контурів координатного та параметричного управління.

### **Б2.2. Безпошукові системи із самонастройкою**

Спосіб компенсації полягає у вимірюванні та неперервній компенсації відхилень фактичної траєкторії зміни координат, які визначають рівень якості функціонування об'єкта, від бажаних траєкторій, які визначають заданий рівень якості.

ПКУ – пристрій координатного управління

ПСН – пристрій самонастройки

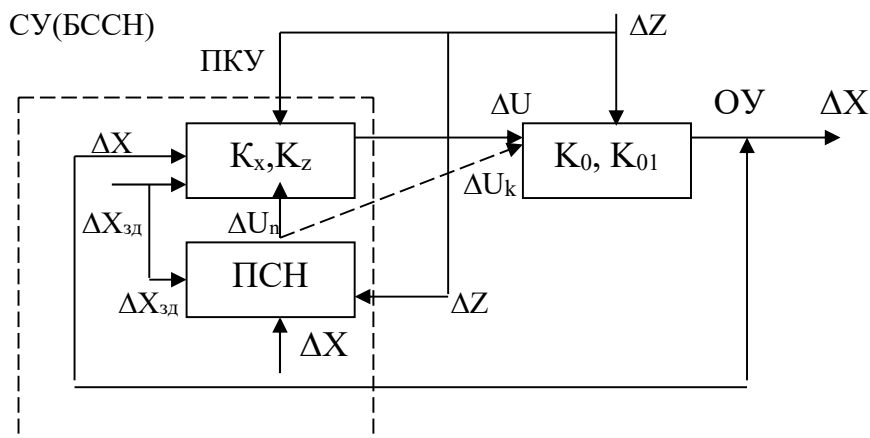


Рис.3.7. Структура безпошукової системи із самонастройкою

Бажаний режим роботи може бути *оптимальним*, тоді – оптимальні системи із самонастройкою. Можуть бути з явними оцінками: за контролем частотних характеристик, або кореляційних функцій вхід-вихід.

Пристрій самонастройки (адаптації) мінімізує відхилення фактичної траєкторії від бажаної, формуючи  $\Delta U_n$  на ПКУ. Часом може бути додаткове діяння  $\Delta U_k$ .

### **Б2.3. Пошукові системи із самонастройкою**

Спосіб компенсації – в автоматичному виборі за допомогою пошукового пристрою самонастройки таких значень параметрів основного контура, при яких забезпечується екстр. функціонала якості. Часто – процедури чисельного пошуку.

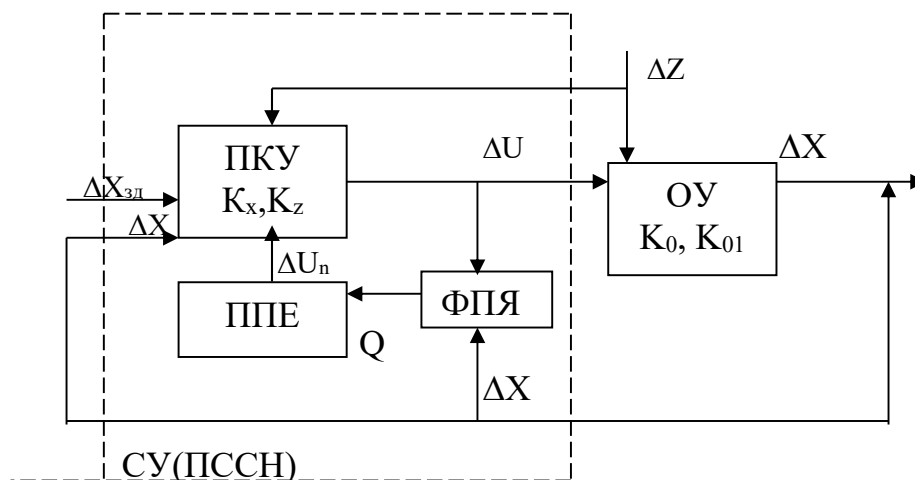


Рис.3.8. Структура пошукової системи із самонастройкою

ПКУ – пристрій координатного управління;

ФПЯ – формувач показників якості управління;

ППЕ – пристрій пошуку екстремального значення показника якості.

Обмеження: швидкість процесу пошуку (швидкість збіжності) повинна бути більшою швидкості зміни динамічних властивостей об'єкта. При цьому – чим більша ця різниця, тим краща якість функціонування.

#### **Б2.4. Автоматичні системи з ідентифікатором**

Спосіб компенсації схожий на системи з еталонною моделлю, але в цьому випадку використовується повна або частково настроювана модель об'єкта, яка адаптується в процесі роботи.

ПКУ – пристрій координатного управління

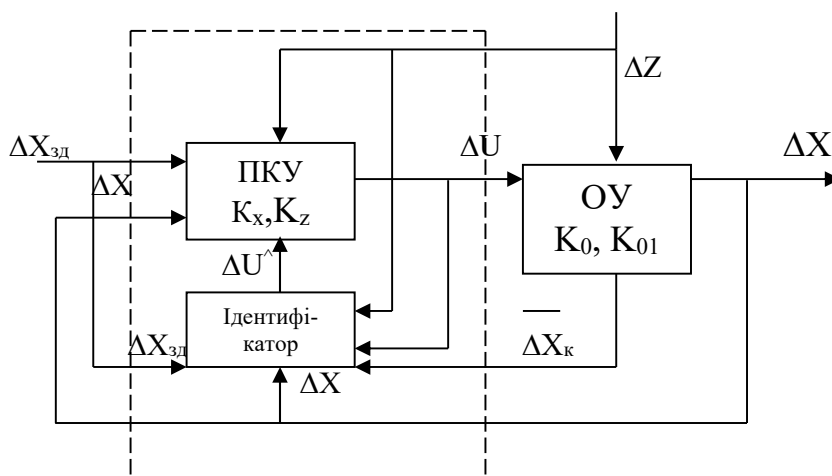


Рис.3.9. Структура адаптивної системи з ідентифікатором

За допомогою цієї моделі визначаються сукупності управляючих діянь, які забезпечують екстремальне або допустиме в конкретних випадках значення показника якості управління.

Для складних об'єктів, які характеризуються різними моделями використовуються *кілька ідентифікаторів*: оперативні (які відслідковують кількісні зміни параметрів) та стратегічні (які відслідковують зміни виду динамічних операторів структури об'єкта).

### ***Б2.5. Системи із змінною структурою***

В цих системах в залежності від бажаної якості регулювання та стану об'єкта дискретно змінюється закон регулювання, тобто структура системи (набір функціональних елементів та зв'язків між ними). Конкретний набір структур управляючого пристрою та логічні умови їх переключення в процесі зміни вихідних координат залежить не лише від виду математичного опису процесів в об'єкті та характеру зміни його параметрів, а й від того, які координати доступні вимірюванню.

В основі системи із змінною структурою лежать дві ідеї:

- перехідні процеси за збуренням чи зміною завдання складаються з відрізків (кусків) траєкторії системи, які відповідають різним динамічним ланкам, що автоматично комутуються при виконанні наперед встановлених співвідношень між значеннями координат об'єкта, регулюючого пристрою та збурень;

- створюється штучний ковзний рух в системі; характерний для нелінійних систем, який практично не залежить від змінюваних параметрів об'єкта. Цей рух забезпечується вибором відповідних операторів в законі управління та порядку їх переключення.

Ці системи використовуються як засіб боротьби із змінюваними параметрами об'єкта та для забезпечення високої якості регулювання, які є для систем з незмінюваною структурою часто протирічними.

[1,с.54-68, 2, с.125-142]



### **Контрольні питання**

1. В чому проявляються особливості ієрархічних систем управління?
2. Охарактеризуйте основні класи задач управління
3. Назвіть типові функціональні структури систем управління
4. В чому особливості координатного, параметричного та структурного управління?
5. Наведіть приклади різних цілей систем управління
6. Які способи компенсації збурень застосовуються в складних системах управління?
7. В чому полягають особливості систем із змінюваною структурою?

### **4. Розв'язання системних задач з використанням методології нечітких множин**

#### **4.1. Формалізація та перероблення якісної інформації. Нечіткі множини**

Якісний аналіз – один з важливих і визначальних етапів системного аналізу, це: збирання, систематизація, формалізація та переробка якісної інформації. Типові ситуації:

- попереднє вивчення складного процесу та формування мети дослідження;
- вибір найбільш важливих ефектів та характеристик (показників) процесу;
- аналіз експериментальних даних з точки зору відповідності реальному процесу;
- оцінка функціонування складних систем;
- прийняття рішень в умовах невизначеності та в нечітко визначених ситуаціях і .д.

Якісна інформація виражається за допомогою звичайної мови, але має нечіткий, наближений характер. Для використання комп'ютерних технологій необхідно співставити словесним термінам кількісні оцінки для формалізації даних та використання математичних методів обробки.

Якісний етап системного аналізу має два аспекти – смисловий та математичний. Смисловий – збирання, оцінка достовірності, систематизація та формалізація інформації. Часто якісна інформація, її достовірність суттєво залежить від психічних та фізіологічних можливостей людини. В свідомості людини формується концептуальна модель як уявлення про стан та особливості об'єкта досліджень.

Формалізація якісної інформації базується на експериментальних даних, які дозволяють співставити нечіткі уявлення та числові множини. В загальному випадку залучаються експерти, а в самому простому вважають, що множина  $X$  складається з двох елементів  $\{0,1\}$ , наприклад “хороша” чи “погана” продукція. Так же технологічні параметри – “високий”, “низький” і т.д., але кожному з них відповідає своє числове значення.

Математичний аспект якісного аналізу полягає в відображенні якісних уявлень в математичні об'єкти.

Наприклад, коли об'єкт характеризується двома координатами стану  $X_1$  і  $X_2$ , то можна прогнозувати величину  $X_2$  при фіксованих значеннях  $X_1$ , а саме: “Якщо зміна величини  $X_1$  велика, то зміна величини  $X_2$  значна, в протилежному випадку  $X_2$  змінюється мало”. Терміни “велике”, “значне”, “слабке” потрібно формалізувати. Технологічні параметри ТК та підсистем складають групи:

- вимірювані автоматично (температура, тиск, рівень, інш.). Людина-оператор може на основі цих параметрів прогнозувати зміни параметрів в неконтрольованих точках, використовуючи нечітку інформацію;
- параметри, які описуються словесними (нечіткими) термінами, а для їх переводу в числовий вид приймає участь людина – експерт (наприклад, якість продукції як інтегральна оцінка).

Передбачається, що формалізація якісної інформації базується на існуванні відповідності між нечітко визначеними характеристиками та математичними об'єктами. Для першої групи параметрів це очевидно, величині параметра ставиться у відповідність числова координата в становленім початком координат та мірою, а величина параметра може описуватись словесно.

Для параметрів першого типу елемент  $x_i \in X$  – конкретні величини (наприклад температура). Кількісною характеристикою  $x_i \in X$  є елементи  $u_j \in U$ . Множина  $U$  – діапазон зміни параметрів  $x_i \in X$ . При словесному описуванні парі  $(x_i, u_j)$  ставиться у відповідність нечіткий термін  $q_k \in Q$  ( $Q$  – множина нечітких термінів). Нечіткі терміни, це – “високий”, дуже “високий”, “низький”, “далеко”, “близько”... На вибір цих термінів значний вплив справляє вибір опорної (реперної) точки – як правило для номінального режиму.

При класичному підході до управління не приймаються до уваги такі фактори як неясність, невизначеність, нечіткість чи неточність, а саме вони є головними в реальному житті, для складних систем. Теорія нечітких множин Л.Заде дала схему розв'язання проблем, в яких суб'єктивна думка чи оцінка відіграють суттєву роль при оцінці фактів

неясності і невизначеності. В 1965 р. американським математиком Л.Заде була запропонована теорія нечітких або розмитих множин, яка отримала назву нечіткої логіки. Ця теорія дала схему розв'язання проблем, в яких суб'єктивні думки або оцінка відіграють суттєву роль при оцінці фактів неясності або невизначеності.

Автор теорії нечітких множин стверджував: "...при зростанні складності точні твердження втрачають значущість, а значущі твердження втрачають точність".

В технічній літературі нечітка логіка отримала назву від терміну "Fuzzy-Logic" (Фуцці-логіка).

Теорія нечітких множин пройшла шлях від розробки формальних засобів представлення погано визначених понять, які використовуються людиною, та апарату для їх обробки до моделювання наближених міркувань, які використовуються людиною в повсякденній діяльності, та до створення комп'ютерів з нечіткою логікою.

Перевага підходу нечіткої логіки перед класичними методами, при описуванні систем управління полягає в тому, що при цьому можна не використовувати аналітичних залежностей. В багатьох випадках достатньо лише професійного опису того, як процесом керує досвідчений оператор (без залучення математичних, хімічних і т.д. залежностей). Нечітка логіка – перша теорія, яка оперує неточними та не зовсім ясними поняттями. Передбачається, що в більшості випадків ситуація оцінюється приблизно, а не точно.

Цей підхід появився об'єктивно тому, що при ускладненні систем зменшується можливість робити точні та значущі твердження відносно поведінки системи і настає межа, за якою точність та значущість

стають взаємовиключаючими характеристиками. Тоді вводяться спеціальні позначення (мітки), які визначають більш-менш нечіткі поняття.

$U$  – універсальна множина (довільний набір об'єктів чи математичних конструкцій);

$A$  – кінцева підмножина  $U$  з елементами  $U_1, U_2, \dots, U_n$

Тоді:  $A = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ,

$A = \{u_i, \mu_A(u_i)\}$ ,  $u_i \in U$ , - кінцева множина впорядкованих пар;

де  $\mu_A(u_i)$  - міра членства, функція належності, яка показує ступінь належності елемента цій множині.

Якщо всі  $\mu_A(u_i) \in \{0, 1\}$ , тобто дорівнюють 0 чи 1, то це звичайна (чітка) множина. Якщо  $\mu_A(u_i)$  може приймати значення в інтервалі від 0 до 1, тоді  $A$  – нечітка (розмита) множина. Тоді:

$\mu_A(u_i) = 0$ , елемент  $u_i$  не належить множині;

$\mu_A(u_i) = 1$ ,  $u_i \in U$ ;

$0 < \mu_A(u_i) < 1$  - визначає ступінь належності  $u_i$  множині  $U$ ,

тоді  $A$  – розмита множина

В розмитій логіці значення істинності може бути розмитою підмножиною будь-якої впорядкованої множини. Практично це розмита підмножина на інтервалі  $[0,1]$ , тобто точка цього інтервалу. Лінгвістичні критерії істинності – “правильно”, “не зовсім правильно” можна інтерпретувати як мітки розмитих множин. Це відповідає природній мові, в якій більшість предикатів розмиті, а не чіткі. Тоді виникають модифікатори предикатів (“дуже”, “більш-менш”, “цілком” і т.д.), які відіграють важливу роль в генеруванні значень логічних змінних: “дуже високий”, “більш-менш важливий” і т.д.

В класичних логічних системах є два квантори: існування та загальності. В розмитій логіці додатково до них використовуються квантори “декілька”, “головним чином”, “майже завжди”, “часто”... В розмитій логіці розмитий квантор інтерпретується як розмите число чи розмита пропорція

Приклад: ріст людини. Для поняття “високий” визначено функції залежності:

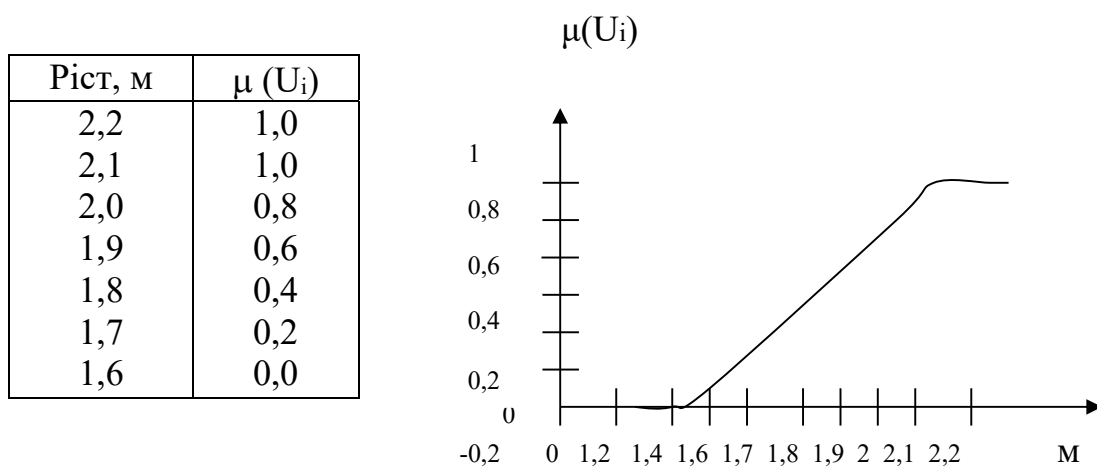
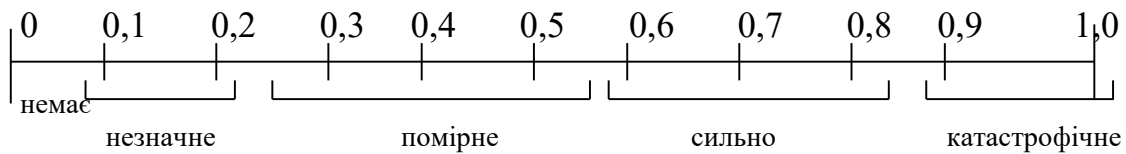


Рис.4.1. Розмита множина при визначенні росту

Лінгвістична змінна – це така змінна, яка задається на кількісній шкалі і приймає значення у вигляді слів та словоутворень природної мови. Окреме значення лінгвістичної змінної або лінгвістичне значення називається термом і задається за допомогою функції належності тобто кожному терму відповідає нечітка множина. Значення лінгвістичної змінної (ЛЗ) описується нечіткими змінними. Лінгвістичні змінні (ЛЗ) використовуються для якісного словесного опису кількісної величини. Будь-яка ЛЗ та всі її значення зв’язані з конкретною

кількісною шкалою (базовою шкалою). Приклад базової шкали для оцінки степені руйнування об'єкта:



Масштаб шкали може бути довільним.

Для віку:

$T(\text{вік}) = \{\text{молодий, старий, дуже молодий, більш-менш молодий...}\}$

Кожний елемент (терм) цієї множини може виражатись через розмиту множину, наприклад:

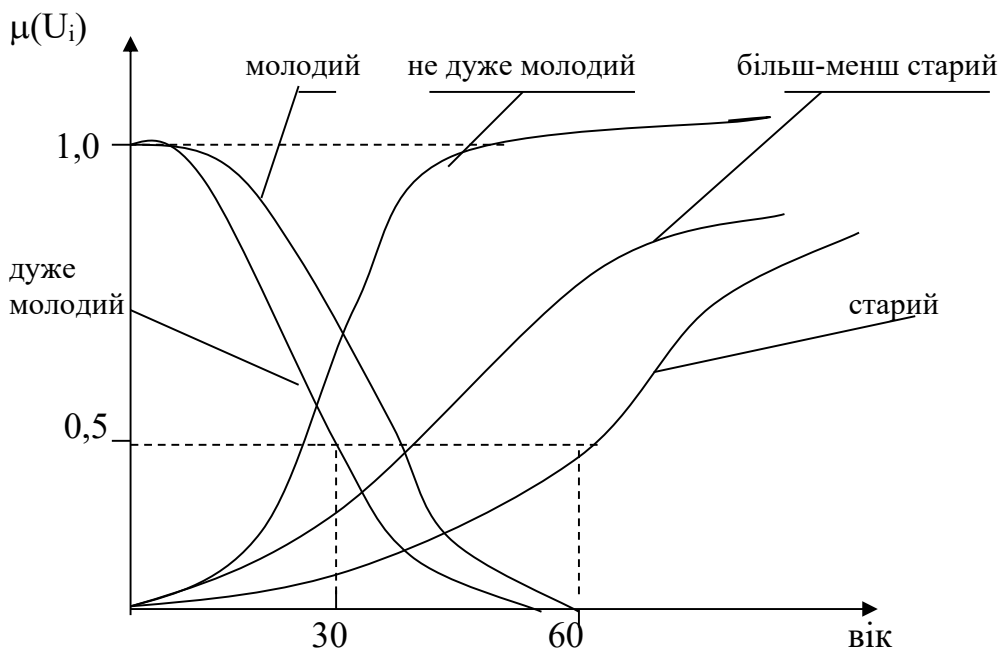


Рис.4.2. Функції належності

Значення лінгвістичних змінних можуть задаватись не лише базовою шкалою, а й функцією. Наприклад, функції належності

допустимих лінгвістичних термів можна задати функцією:

$$1 - \exp \left[ - \left( \frac{0.5}{|\alpha - x|} \right)^{2.5} \right], \quad (4.1)$$

$\alpha$  та константа в чисельнику залежить від характеру лінгвістичної змінної. Так для значення “високий” функція має вигляд:

$$1 - \exp \left[ - \left( \frac{0.5}{|1 - x|} \right)^{2.5} \right], \quad (4.2)$$

$$\text{а “досить високий”}: 1 - \exp \left[ - \left( \frac{0.5}{|10.7 - x|} \right)^{2.5} \right], \quad (4.3)$$

$$\text{“майже високий”}: 1 - \exp \left[ - \left( \frac{0.5}{|10.4 - x|} \right)^{2.5} \right], \quad (4.4)$$

$$\text{“середній”}: 1 - \exp(-5|x|),$$

$$\text{“досить низький”}: 1 - \exp \left[ - \left( \frac{0.5}{|-0.4 - x|} \right)^{2.5} \right], \quad (4.5)$$

Для управління на базі нечіткої логіки (фуцці-управління) характерним є безпосереднє застосування експертних знань, які формуються якісно, для генерування необхідних впливів на об’єкт. Знання щодо взаємодії з процесом за цією методикою подаються у формі правил виду:

ЯКЩО (початкова ситуація), ТО (відповідна реакція)

Така логічна конструкція відповідає природній поведінці людини в конкретній ситуації, наприклад:

ЯКЩО (температура висока), ТО (зменшити дещо подачу пари)

Або:



ЯКЩО (температура висока) ТА (швидкість зростання температури значна), ТО (припинити подачу пари).

Використовуючи функції належності, можна записати такі вирази:

$$M = \mu_1 | x_1 + \mu_2 | x_2 + \dots, \quad (4.6)$$

де  $M$  – сукупність об'єктів, які належать основній множині  $X$ ;

$X$  – об'єкти множини  $M$ .

Цей вираз – не алгебраїчна сума, а лише визначає, що елементи  $X_i$  відносяться до множини  $M$  з функціями належності  $\mu_i$ . Це може бути формою запису математичної моделі в нечіткому середовищі. Можна записати також:

$$M = \{ (x_1, \mu_1), (x_2, \mu_2), \dots, (x_i, \mu_i) \} \quad (4.7)$$

По аналогії із звичайними множинами в нечіткій логіці формуються основні операції над множинами  $A$  та  $B$

- множина логічного об'єднання

$$C = A \cup B \text{ (АБО):}$$

$$\mu_c(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)); \quad (4.8)$$

- множина логічного перетину (ТА)

$$C = A \cap B:$$

$$\mu_c(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)); \quad (4.9)$$

- множина логічного доповнення (НІ)

$$C = \overline{A}:$$

$$\mu_c(x) = 1 - \mu_A(x); \quad (4.10)$$

Головною операцією нечіткої логіки є процедура нечіткого висновку, за допомогою якої з нечітких умов отримують наближені рішення (розв'язки). Процедура нечіткого висновку заснована на

операції логічного слідування (імплікації), яка використовується в традиційній математичній логіці.

Імплікація дозволяє формалізувати знання експерта за формою “якщо А, то В”, де: А – передумова, В – висновок. Стосовно нечіткого управління Х – базова множина значень х регульованої змінної (координати). Тоді Х- базова множина х, А – множина значень х; U – базова множина значень управлінь u, В – множина значень u.

В залежності від способу отримання логічних висновків з нечітких правил можуть бути різні регулятори. Для промислового використання частіше використовується алгоритм нечіткого регулятора Мамдані, коли регулятор формує чітке однозначне управління за допомогою процедури дефазифікації.

Початковими даними для такого алгоритму є:

- антецеденти n правил  $A_{11,12} \dots A_{1n}, A_{22} \dots A_{2n}, A_{n2} \dots A_{nn}$ , які відповідають функціям належності  $\mu$  і зв'язані логічними операціями кон'юкції ( $\cap$ ), диз'юкції ( $\cup$ ) чи інверсії ( $\overline{\phantom{x}}$ );
- висновок n правил  $B_1, B_2 \dots B_n$  з відповідними функціями належності;
- конкретні значення  $x_1^*, x_2^* \dots x_m^*$  вхідних змінних  $x_1, x_2 \dots x_m$ .

В результаті необхідно отримати управління  $U^*$ , для чого:

- за допомогою основних операцій визначають значення істинності передумов n правил

$$\mu_{A1}(x_1^*, x_2^* \dots x_m^*), \mu_{A2}(x_1^*, x_2^* \dots x_m^*) \dots \mu_{Am}(x_1^*, x_2^* \dots x_m^*); \quad (4.11)$$

- враховується, що у відповідності з основним правилом логічного висновку істинність висновку В не може перевищувати істинність передумови А, тому  $\mu_B(U)$  обмежується зверху на рівні  $\mu_A(x^*)$ :

$$\mu_{B1}(U) = \min\{\mu_{A1}(x_1^*, \dots x_m^*), \mu_{B1}(U)\}$$

$$x \in A$$

$$\mu_{B_n}^*(U) = \min\{\mu_{A_n}(x_1^*, \dots, x_m^*), \mu_{B_n}(U)\} \quad (4.12)$$

- здійснюється агрегування кількох правил “ЯКЩО...ТО...” шляхом максимізації функцій належності всіх об’єднаних правил. В результаті функція належності управляючого діяння буде:

$$\mu_{B_p}(y) = \max\{\mu_{B_j}(U)\}, j \in (1, n); \quad (4.13)$$

- здійснюють процедуру дефазифікації для знаходження конкретного значення управління. Серед різних методів найбільш розповсюдженим є метод центра ваги, коли

$$y^* = \frac{\int y \mu_{B_p}(U) dU}{\int \mu_{B_p}(U) dU}, \quad (4.14)$$

Таким чином дефазифікація – процедура генерування управління.

Це управління на виході функції-контролера (нечіткого регулятора) отримують як нечітку множину в формі функцій належності.

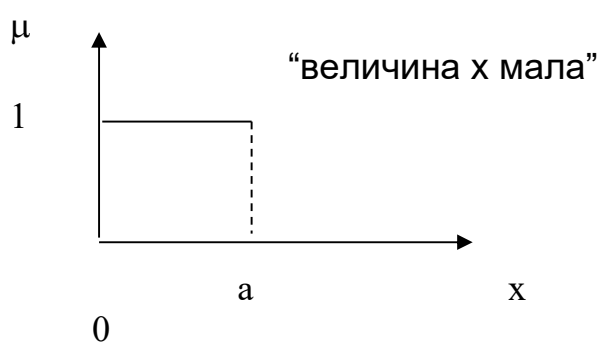
Метод центра ваги передбачає, що управління обчислюється як значення абсциси центра ваги площини, яка утворена функцією належності та віссю абсцис.

## 4.2. Функції належності

Вибір виду функцій належності та їх параметрів значною мірою визначається досвідом, інтуїцією та іншими суб’єктивними факторами, в тому числі особою, яка приймає рішення – (ОПР). Тут саме і виникають нові невизначеності суб’єктивного характеру.

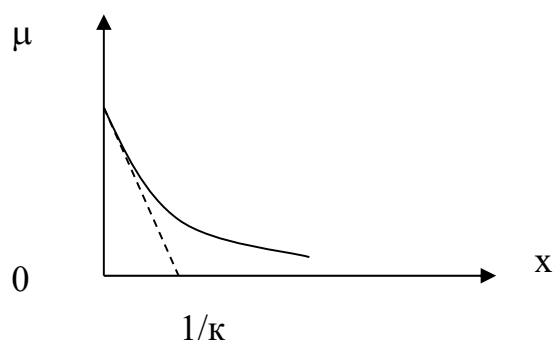
Приклади.

- функції степенів належності твердження

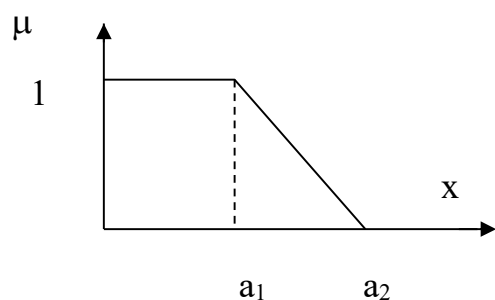


$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a \\ 0, & x \neq a \end{cases},$$

(4.15)

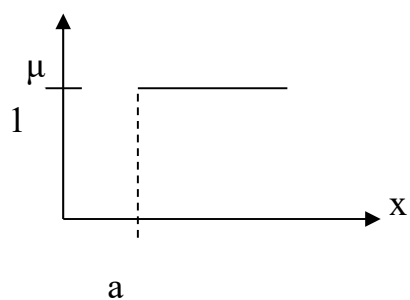


$$\mu(x) = e^{-\kappa x}; \kappa > 0 \quad (4.16)$$



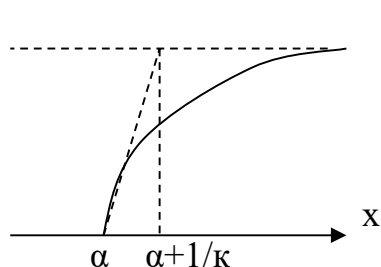
$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 0, & a_2 \leq x \end{cases} \quad (4.17)$$

- функції степенів належності твердження “величина  $x$  велика”



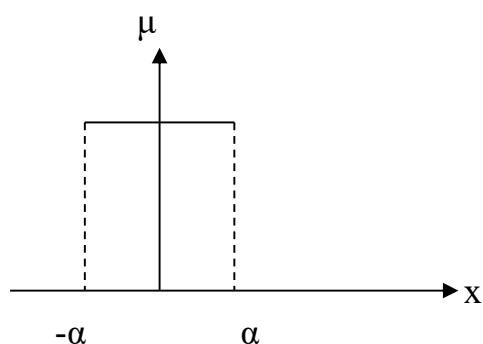
$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a \\ 0, & a \leq x \end{cases} \quad (4.18)$$





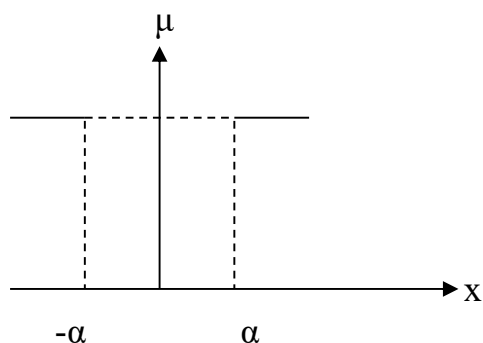
$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq \alpha \\ 1 - e^{-\kappa(x-\alpha)}, & \beta \leq x, \quad \kappa > 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

- функція степенів належності твердження “величина  $|x|$  мала”



$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & -\infty < x < -\alpha \\ 1, & -\alpha \leq x \leq \alpha \\ 0, & \alpha < x < \infty \end{cases} \quad (4.20)$$

Те ж, “величина  $|x|$  велика”



$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & -\infty < x < -\alpha \\ 0, & -\alpha \leq x \leq \alpha \\ 1, & \alpha < x < \infty \end{cases} \quad (4.21)$$

Функція степенів належності може задаватись:

- самостійно дослідником, на основі власного досвіду; - в простому випадку;
- із залученням експертів, обробкою їх оцінок – для складних та відповідальних випадків.

Важливість використання логіко-лінгвістичних змінних обумовлена причинами:

- не всі критерії оптимізації можуть задаватись кількісно;

- між рядом параметрів, які впливають на функціонування АТК, не вдається встановити точних кількісних залежностей;
- процес оптимізації в АТК – багатокроковий, а зміст кожного кроку не завжди можна визначити однозначно;
- існуючі способи опису самих АТК (їх структури) та процесів в них – дають громіздкі залежності, їх важко або неможливо використовувати;
- в змінюваних умовах зовнішнього середовища та властивостей АТК утруднюються процеси адаптації, тим більше, що окремі підсистеми мають активну природу, тобто є людино-машинними.

Процедури завдання дослідником функції належності в нечітких підмножинах:

- визначається діапазон зміни величини параметра  $x \in X$  з множини  $\Omega$ ;
- знаходять відображення  $\varphi: \Omega \rightarrow U$ , де  $U \in [0,1]$ . В якості  $\varphi$  може бути використане будь-яке перетворення, зокрема лінійне;
- величина параметра  $x \in X$  описується словесно множиною термінів  $Q$ , наприклад  $Q^\Delta = \{\text{високий, дуже високий, не високий, низький, дуже низький і.т.д.}\}$ . Потрібно, щоб в  $Q$  були відсутні терміни – синоніми, в протилежному випадку проводять їх класифікацію у відповідності з термінологією, яка існує в цій галузі (температура  $120^\circ$  в цукровій промисловості – висока, в металургії – дуже низька);
- на множині  $Q$  вводиться термін  $q_0 \in Q$  – “норма”, а відносно нього симетрично визначається терміном  $q_k \in Q$ ,  $k=1,n$  та протилежні їм за смислом  $q_e \in Q$ ,  $e=1,n$ ;

- функції належності  $\mu_j(U)$ ,  $j=1, (2n+1)$ , встановлюють відповідність  $Q \rightarrow U$  з точністю до якісних відмінностей первинних термінів та прийнятих операцій над нечіткими множинами;
- термін “норма”, тобто  $q_0 \in Q$  і  $u_0 \in U$  визначає і форму функції  $\mu(U)$ , а також вимагає виконання таких асимптотичних властивостей:

$$\lim_{U \rightarrow 0} \mu(U) = a; \quad \lim_{U \rightarrow 1} \mu(U) = b \quad (4.22)$$

$a, b$  – постійні для даного терміна.

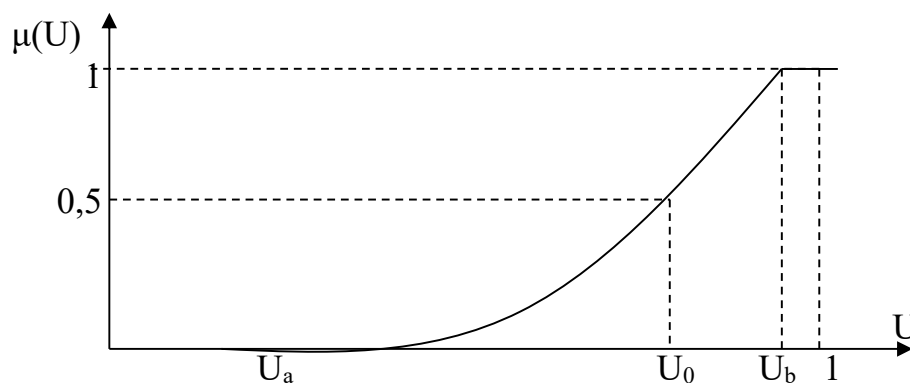


Рис.4.3. Функція степені належності  $\mu(U)$ , яка формалізує термін «високий»

$U_0$  – опорний елемент  $U_0 \in U$ , який відповідає поняттю “норма”. Як правило – це 0,5 ( $\mu(U_0)=0,5$ ). Звичайно, тут є значний суб’єктивізм відносно вибору  $U_0$

Умова  $\lim_{U \rightarrow 0} \mu(U)=0$  означає, що елементи  $U < U_0$  в меншій степені

можна віднести до терміну “високий”, чим  $U_0$ .

Умова  $\lim_{U \rightarrow 1} \mu(U)=1$  показує, що для  $U > U_0$  ступінь належності до

терміну “високий” зростає.

Нечітка множина, яка формується, вважається нормальною при

$$\sup_{u \in U} \mu(U) = 1 \quad (4.23)$$

Враховуючи асимптотичні властивості функції  $\mu(U)$ , дослідник може встановити інтервали  $[0, U_a]$  та  $[U_b, 1]$ , на яких функція задається чітко класифікацією

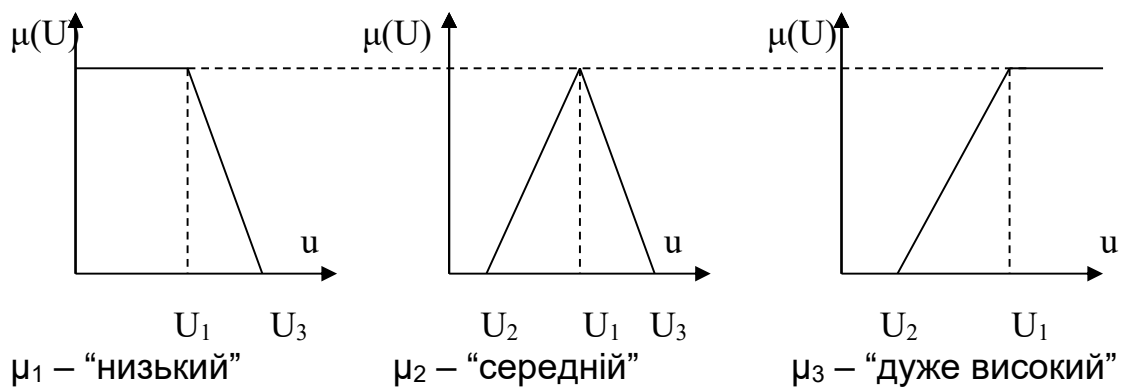
$$\mu(U) = \begin{cases} 0 & \text{при } U \in [0, U_a] \\ 1 & \text{при } U \in [U_b, 1] \end{cases} \quad (4.24)$$

Найскладніше задати  $\mu(U)$  при  $U \in [U_a, U_b]$ . На цьому інтервалі для будь-якого  $U \in [U_a, U_b]$  дослідник задає  $\mu(U)$  в залежності від різниці  $(U - U_0)$  з урахуванням знаку. Приймається, що функція  $\mu(U)$  є монотонною, а розриви можуть бути за умови, що в процесах трапляються “катастрофи”, тобто система стає нестійкою.

Для визначення функцій степені належності експертами рекомендуються такі процедури:

1. Виділення точки  $u_1 \in U$  на універсальній шкалі, яка, за думкою експерта, точно відповідає нечіткій множині. В цьому випадку  $\mu(U_1) = 1$ . Це розглядається на випадок, коли для формалізації термінів приймаються три елементи  $U_i (i=1,3)$  універсальної множини  $U$ . Для зменшення психологічного навантаження на експерта кількість термінів необхідно зменшувати. На рис. – спосіб завдання функцій належності, за допомогою яких формалізуються поняття “низький”, “середній”, “дуже високий”.





2. Знаходження на універсальній шкалі зліва та справа від  $U_1$  точок, які, на думку експерта, не можна відносити до цього терміну. Це точки  $U_2$  та  $U_3$ , для яких  $\mu(U_2) = \mu(U_3) = 0$ .

3. Графічна побудова функцій за обраними точками при умові лінійної апроксимації.

4. Виділення підмножини  $U_1 \leq U$ , на якій визначена формалізація терміну,  $U_1 = [U_2, U_3]$ . Часом точки  $U_2, U_3$  можуть відноситись в нескінченність.

Це – один з найбільш простих способів.

При управлінні технологічними установками діапазон зміни кожного параметра задається відрізком (технологічні параметри – нечіткі підмножини деяких універсальних множин)

$$x_i = [a_i^{\min}, a_i^{\max}]; \quad y_i = [b_i^{\min}, d_i^{\max}]$$

кожен з відрізків розбивають на інтервали, наприклад:

$$a_i^{\min} = a_{i1} < a_{i2} < \dots < a_{ik} = a_i^{\max}$$

Значення величини параметра, яке знаходиться в одному з інтервалів, словесно характеризують термінами “малий”, “середній”, “великий”.

Тоді функція належності в нечітких підмножинах, які формалізують прийняті терміни, описують залежністю:

$$\mu(x_i) = \exp(-Q_i | x_i - a_{ip}^1 |) \quad (4.25)$$

$Q$  – постійна величина, яка знаходиться при ідентифікації функції

належності:

$$a_{ip}^1 = (a_{ir} + a_{ir+1})/2$$

#### Приклад

Параметр	Діапазон зміни	Термін, інтервал дискретизації	Функція
Витрата, м <sup>3</sup> /с	70-110	мала: 70 - 80	$\exp(-\frac{1}{5} \ln \frac{1}{2}   x_1 - 751  )$
		середня: 80 - 90	$\exp(-\frac{1}{5} \ln \frac{1}{2}   x_1 - 851  )$
		велика: 90 - 110	$\exp(-0,1 \ln \frac{1}{2}   x_1 - 1001  )$
Температура, °С	480-490	мала: 480 - 482,5	$\exp(-\frac{1}{1,25} \ln \frac{1}{2}   y_1 - 481,5  )$
		середня: 482,5 - 485	$\dots   y_1 - 483,75  $
		висока: 485 - 490	$\dots   y_1 - 487,5  $

### 4.3. Принципи і структура системи управління з нечітким регулятором

Навіть найскладніші об'єкти (нелінійні, багатопараметричні, невизначені) успішно управляються досвідченими операторами на основі інтуїтивних правил "ЯКЩО...ТО", які не мають чіткого інформаційного забезпечення.

Стратегія управління, яку використовує оператор, часто може формуватись як набір правил, які достатньо просто виконати

вручну, але важко формалізувати за допомогою звичайних алгоритмів.

Основна причина цього – користування оператором якісними, а не кількісними оцінками при описуванні умов прийняття рішень. Саме тут і використовується апарат нечітких множин.

На рис.4.4 наведена схема нечіткого контролера

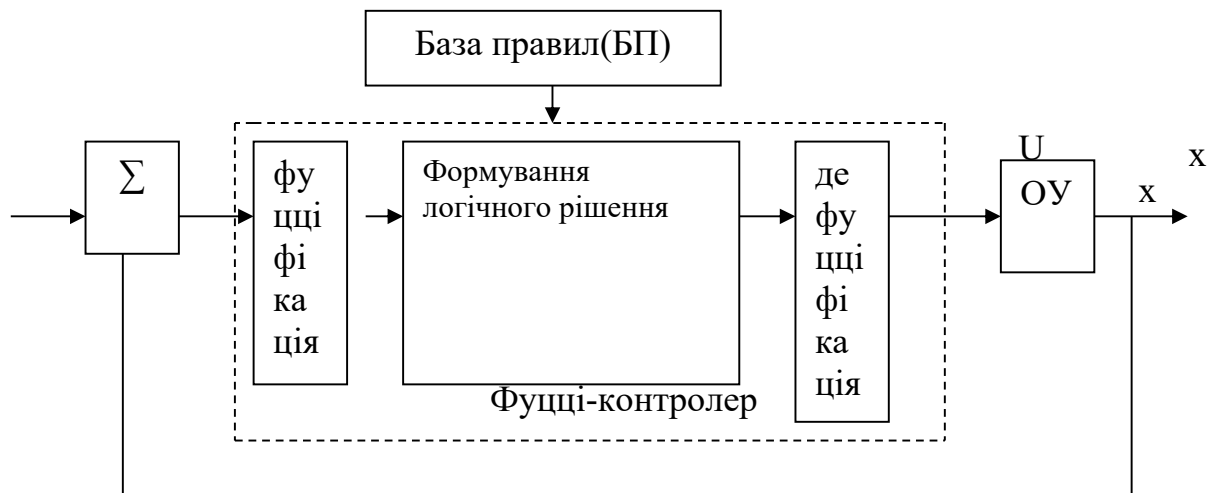


Рис.4.4. Структура системи з нечітким контролером

Процедура фуцціфікації параметрів – переведення поточних значень вхідних змінних в лінгвістичні величини (можливий чисельний діапазон параметрів якісно характеризують лінгвістичними величинами “мале”, “середнє”, “велике”). Кожна лінгвістична величина інтерпретується як фуцці-множина і описується функцією належності. Якісні оцінки тим самим переводяться в кількісні в тому смислі, що для кожного поточного числового значення змінної процесу ставиться у відповідність степінь належності до тієї нечіткої підмножини, яка символізує конкретну лінгвістичну змінну. Функції належності, як правило, перекривають одна другу, тому для кожної змінної кілька функцій належності можуть оцінювати різні величини істинності, які відрізняються від нуля.

Формування логічного рішення здійснюється на основі лінгвістичного правила “ЯКЩО А, ТО В” – “робочого правила”. Частина “ЯКЩО” (передумова) може означати спряження будь-якої складності логічних операцій. Частина “ТО” (рішення, висновок) являє собою просто визначення лінгвістичної величини для вихідної дії контролера. При цьому так формулюються правила, що досягається результат, при якому для будь-якої лінгвістичної величини управління як мінімум одне з правил є прийнятим.

Для прикладу розглянемо управління об'єктом великої потужності, якість готового продукту якого залежить від багатьох факторів, головними з яких є: температура, тиск та маса сировини (навантаження). Температуру та тиск змінювати оперативно в потрібному напрямку складно, тому обирають зміну сировини як ефективне управління: масу сировини  $M$  потрібно змінювати на величину  $\Delta M$  так, щоб забезпечити повне співвідношення між температурою  $T$ , тиском  $P$  та масою  $M$  (це співвідношення попередньо визначається технологічним регламентом).

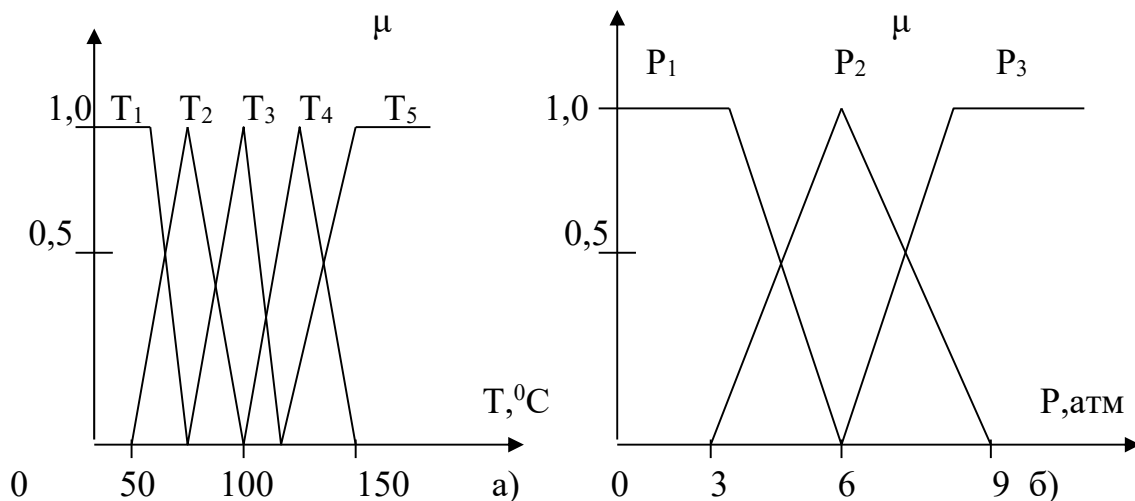


Рис. 4 Функції належності змінних а)- температури; б)- тиску

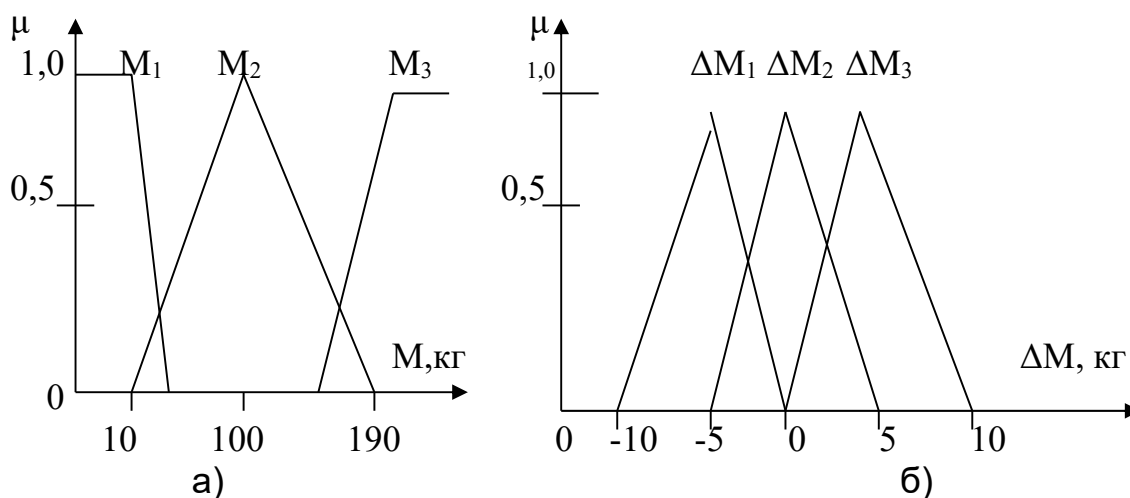


Рис.4.5. Функції належності змінних:

а) – маси; б) - зміни маси

На рис.4.5 наведені експертні уявлення лінгвістичних змін-них  $T$ ,  $P$ ,  $M$  і  $\Delta M$  за допомогою кількох термінів у вигляді функцій належності, а саме:

- $T = \{ \text{“дуже низька”} (T_1), \text{“низька”} (T_2), \text{“середня”} (T_3), \text{“висока”} (T_4), \text{“дуже висока”} (T_5) \};$
- $P = \{ \text{“достатньо мале”} (P_1), \text{“середнє”} (P_2), \text{“достатньо високе”} (P_3) \};$
- $M = \{ \text{“достатньо мале”} (M_1), \text{“середнє”} (M_2), \text{“достатньо велике”} (M_3) \};$
- $\Delta M = \{ \text{“зменшити”} (\Delta M_1), \text{“не змінювати”} (\Delta M_2), \text{“збільшити”} (\Delta M_3) \}.$

База правил (знань) має форму

“ЯКЩО  $M = \dots$  та  $P = \dots$  ТА  $T = \dots$ , ТО  $\Delta M = \dots$ ”,

наприклад “ЯКЩО  $M = \text{“середнє”}$  ТА  $P = \text{“достатньо мале”}$  ТА  $T = \text{“низька”}$ , ТО  $\Delta M = \text{“зменшити”}$ ”.

Цю базу правил зручно звести в таблицю (табл.4.1).

Таблиця 4.1.

## База правил

		M <sub>1</sub>					M <sub>2</sub>					M <sub>3</sub>				
		T					T					T				
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>
P	P <sub>1</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>1</sub>	ΔM <sub>1</sub>	ΔM <sub>1</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>1</sub>	ΔM <sub>1</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>
	P <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>3</sub>	ΔM <sub>1</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>3</sub>	ΔM <sub>1</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>
	P <sub>3</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>3</sub>	ΔM <sub>3</sub>	ΔM <sub>3</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>3</sub>	ΔM <sub>3</sub>	ΔM <sub>3</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>	ΔM <sub>2</sub>

Таким чином, для всіх вхідних і вихідних змінних задані лінгвістичні терми, які відповідають певним діапазонам чітких значень та сформована таблиця на основі умовних висловлювань.

На основі наведених вище процедур нечіткого управління отримано:

- фадифіковані змінні:  $T_1(T^*) = T_2(T^*) = T_3(T^*) = 0$ ;  
 $T_4(T^*) = 0,4$ ;  $T_5(T^*) = 0,6$ ;  
 $P_1(P^*) = 0$ ,  $P_2(P^*) = 0,66$ ,  $P_3(P^*) = 0,33$   
 $M_1(M^*) = 0$ ,  $M_2(M^*) = 0,78$ ,  $M_3(M^*) = 0$
- функція належності для управління має наступний вигляд (рис.4.6.):

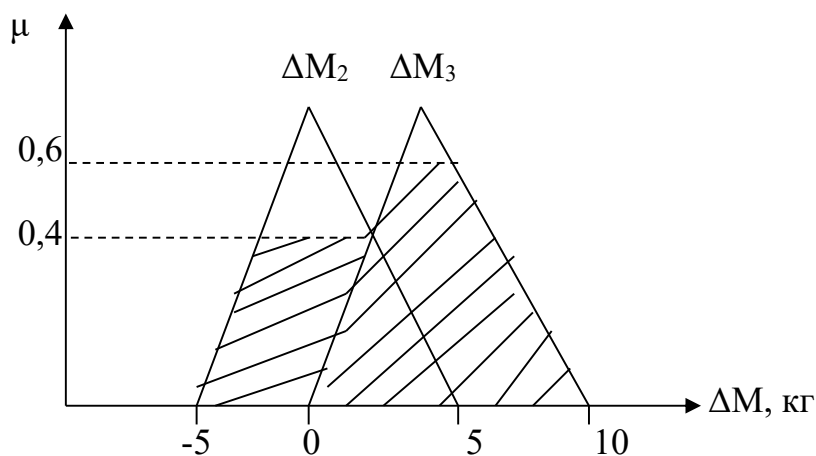


Рис.4.6. Функція належності для управління

В результаті дефадифікації отримано:  $\Delta M^* = 4,5$  т, тобто за даних умов доцільно збільшити масу сировини на 4,5 т.

Важливість використання методології нечітких множин при автоматизації виробництва підтверджується значною кількістю публікації в науково-технічній літературі та спеціалізованому журналі “Fuzzy sets and systems” (США). Традиційні методи теорії управління модифікуються з урахуванням можливостей нечіткої логіки, наприклад: оцінка надійності систем; ідентифікація станів обладнання (діагностика); ідентифікація нечітких регресійних моделей та інш. Значне місце приділяється застосуванню нечітких регуляторів для управління складними технологічними об'єктами, ліфтами у висотних будинках, рухом потягів метрополітену і др.

[1,с.69-84]

### **Контрольні питання**

1. Що таке якісна інформація в системах управління?
2. В чому полягають задачі якісного аналізу?
3. Наведіть приклади нечітких термінів
4. Дайте визначення нечітких множин
5. Що таке функції належності?
6. Наведіть приклади функцій належності
7. Наведіть приклад логічної конструкції
8. В чому полягає процедура нечіткого висновку?
9. Як функціонує нечіткий регулятор?
10. Наведіть приклад структури системи управління з нечітким регулятором

## **5. Координація в складних системах управління**

### **5.1. Постановка задачі координації в дворівневій структурі**

При автоматизації складних об'єктів, наприклад технологічних комплексів, задача оптимізації виробництва формулюється як задача верхнього рівня управління. Ця задача розв'язується відносно обмеженої кількості змінних стану, спостереження та управління, тобто лише тих, які суттєво впливають на хід та показники виробництва. В цьому випадку більшість технологічних змінних підтримуються на заданому чи оптимальному рівні системами автоматизації підсистем, виділених за певними ознаками в технологічному комплексі. Для побудови структури системи управління використовуються методи декомпозиції, що дозволяє розподілити прикладні функції між рівнями ("по вертикалі") та між підсистемами ("по горизонталі").

Процес функціонування ТК та системи управління ним дає можливість стверджувати, що в загальному випадку виникає задача координації роботи управляємих підсистем, і тільки в цьому випадку можна забезпечити найкращі техніко-економічні показники функціонування автоматизованих ТК. Розв'язанням задачі координації є визначення взаємодії підсистем, при яких управління, оптимальні за критеріями ефективності кожної з підсистем, є також оптимальними за загальним критерієм для ТК в цілому. Координація є специфічною задачею ієрархічної системи управління та на сьогодні використовує ряд принципів, на яких засновані ітеративні та базітеративні процедури розв'язання поставленої задачі. Основними є принципи координації:



- прогнозування взаємодій, коли координація здійснюється шляхом задання змінних взаємодії координуємих підсистем (це відповідає проміжним завданням);
- узгодження взаємодій, який передбачає модифікацію локальних функцій мети за допомогою параметрів, які задаються координатором (це відповідає проміжним цінам);
- оцінки взаємодій, який можна розглядати як узагальнення принципу прогнозування взаємодій на випадок, коли в підзадачах нижнього рівня координатором задаються області допустимих значень змінних взаємодії підсистем.

Для ефективного функціонування системи управління ТК важливими є умови координуємості та сумісності підзадач управління. Ці умови гарантують розв'язання загальної задачі, якщо існує розв'язок кожної з підзадач. В загальному випадку постулат сумісності для двохрівневої системи управління формується так.

Підзадачі системи сумісні, якщо реалізація рішень підзадач нижнього рівня завжди забезпечує досягнення загальної мети функціонування системи.

Проблема створення систем управління, які завжди задовольняють постулату сумісності, включає не тільки питання розробки відповідних методів та алгоритмів, а й питання коректності підзадач управління, стійкості алгоритмів до обчислювальних похибок та реалізації управління комплексами стохастичних підсистем.

Множина досяжності для ТК співпадає з множиною досяжності сукупності підсистем, які входять до ТК та координуються в ієрархічній системі управління, якщо дії координації, що визначають змінні взаємодії підсистем, знаходяться в області допустимих значень цих

змінних. Якщо припустити, що існує розв'язок загальної задачі управління ТК, то існують і розв'язки підзадач оптимального управління підсистем та координації їх роботи. Це одна з необхідних умов сумісності підзадач ієрархічної системи управління.

Ще однією умовою є коректність загальної задачі та підзадач управління в ієрархічній системі.

Особливого значення набуває оцінка впливу наближеного характеру математичних моделей, що може привести до нестійких рішень, а також до недопустимих похибок в розв'язанні задачі на основі цих моделей.

Умови сумісності підзадач ієрархічної системи управління ТК включають такі основні положення:

- підзадачі нижнього рівня, тобто підзадачі управління підсистемами, повинні бути коректними;
- алгоритм розв'язку задачі координації забезпечує пошук таких дій координації, при яких рішення підзадач нижнього рівня відповідає екстремуму (в загальному випадку локальному) загального показника ефективності ТК;
- алгоритми рішення підзадач нижнього рівня та підзадачі координації повинні бути стійкими по відношенню до обчислювальних похибок.

Для прикладу розглядається дворівнева система, а для системи з більшим числом рівнів дворівневі структури можна використувати як складові модулі (рис.5.1.). Передбачається, що в технологічному комплексі виділено  $N$  підсистем, при функціонуванні яких можуть виникнути конфліктні ситуації. Так, при послідовному з'єднанні підсистем економічність  $E$  їх роботи в залежності від навантаження  $Q$

можуть мати вигляд кривих 1 і 2, а робоча точка А може змінювати своє положення в зв'язку з деформуванням та дрейфом кривих.

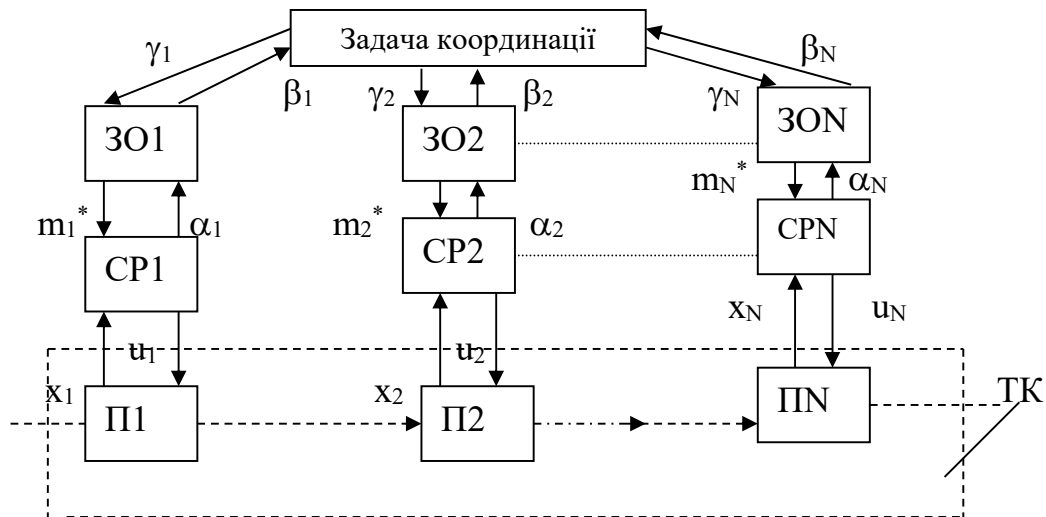


Рис.5.1. Структура системи управління ТК

$\alpha_i$  – вектор агрегованих змінних для  $i$ -ої підсистеми;  $m_i^*$  – вектор управління (завдання змінних стану), визначений в  $i$ -й задачі оптимізації;  $\gamma_i$  – параметр координації;  $\beta_i$  – вектор інформації про оптимізацію  $i$ -тої підсистеми; ЗО – задача оптимізації; CP– система регулювання,

П – підсистема ТК;  $x_i$  – координати стану;  $u_i$  – управління.

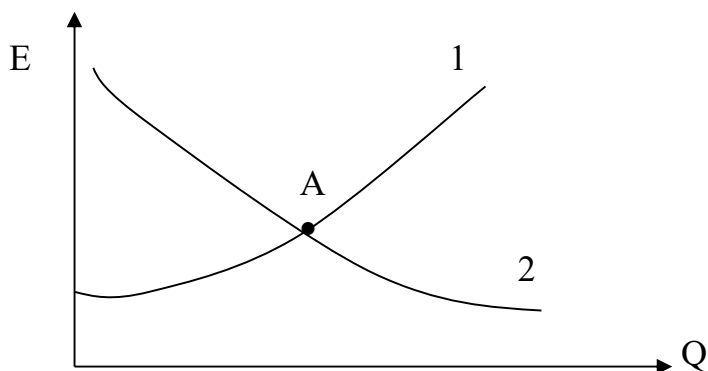


Рис.5.2. Залежність економічності підсистем Е  
від навантаження Q

Для умов цукрового виробництва можна розглядати підсистеми екстрагування та випарювання дифузійного соку. Економічність екстрагування при збільшенні відкачки збільшується (зменшуються втрати цукру). Економічність випарювання при збільшенні відкачки зменшується, тому що при цьому витрачається більша кількість палива. Існує така точка А, в околі якої необхідно підтримувати робочий режим координуємих підсистем, тобто дифузії і випарювання. Положення точки А при роботі змінюється, тому що змінюється характеристика сировини кількість та характеристика енергоносіїв, тому пошук цієї точки повинен здійснюватись постійно, в цьому полягає задача координації.

### 5.2. Процедури та алгоритми координації

Якщо для координуємих підсистем відомі критерії оптимальності і вони мають вигляд інтегральної функції

$$I_i = \int_0^t F(X, U, Z, t) dt \rightarrow 0 \quad (5.1)$$

то самим простим шляхом управління ТК є адитивна функція згортки

$$I_{mk} = \sum_{i=1}^N I_i \rightarrow \max \quad (5.2)$$

В цьому випадку повинна виконуватись вимога, щоб критерії  $I_i$  були однієї розмірності, або якщо вони різної розмірності, то їх можна штучно нормалізувати.

Вважають, що для кожної підсистеми існує критерій управління, який має техніко-економічну природу, тоді їх сума не викликає сумнівів. Часто критерій  $I_{TK}$  подають у вигляді

$$I_{mk} = \alpha_1 I_1 + \alpha_2 I_2 + \dots \quad (5.3)$$

тоді  $\alpha_i$  характеризує “вагу” конкретного критерію, тобто його значущість, і може умовно надавати можливість додавати критерії різної розмірності.

В задачах координації підсистем ТК використовуються ітераційні алгоритми.

При технічній реалізації алгоритмів використовуються такі процедури:

1. Рішення задачі координації повинно гарантувати розв’язок загальної задачі управління ТК в результаті розв’язання підзадач нижнього рівня, тому процедури координації необхідно визначати, виходячи із загальної мети та показників ефективності роботи ТК в цілому.

2. Для формування процедур координації необхідно мати адекватні математичні моделі підсистем, або використовувати процедури їх ідентифікації в умовах існуючих збурень.

3. Задача управління ТК в цілому є складною, і навіть за умов використання сучасних ЕОМ та обчислювальних мереж, часто доцільно отримувати часткові рішення в умовах дефіциту машинного часу. Це може бути проміжна ітерація, рішення на якій забезпечує суттєве підвищення ефективності роботи ТК. За цих умов в будь-якій точці допустимої області значень змінних необхідно визначити оцінки змінних взаємодії підсистем в напрямку найбільшого зростання показника ефективності ТК.

Основними особливостями таких процедур координації є:

1. На кожній ітерації передбачається найбільше зростання показника ефективності ТК в умовах урахування зв'язків між підсистемами.
2. Проміжні результати на кожній ітерації задовольняють існуючим обмеженням і можуть бути основою для визначення управлінь, які відповідають кращим значенням загального показника ефективності ТК в порівнянні з попередніми ітераціями.
3. Задача координації для ТК розв'язується на основі математичних моделей підсистем, тобто не потрібна складна та громіздка модель для ТК.
4. Необхідно враховувати, що ітераційний процес координації в загальному випадку забезпечує досягнення лише локальних екстремумів загального показника ефективності. В той же час для складних ТК навіть цей режим дає значний ефект.

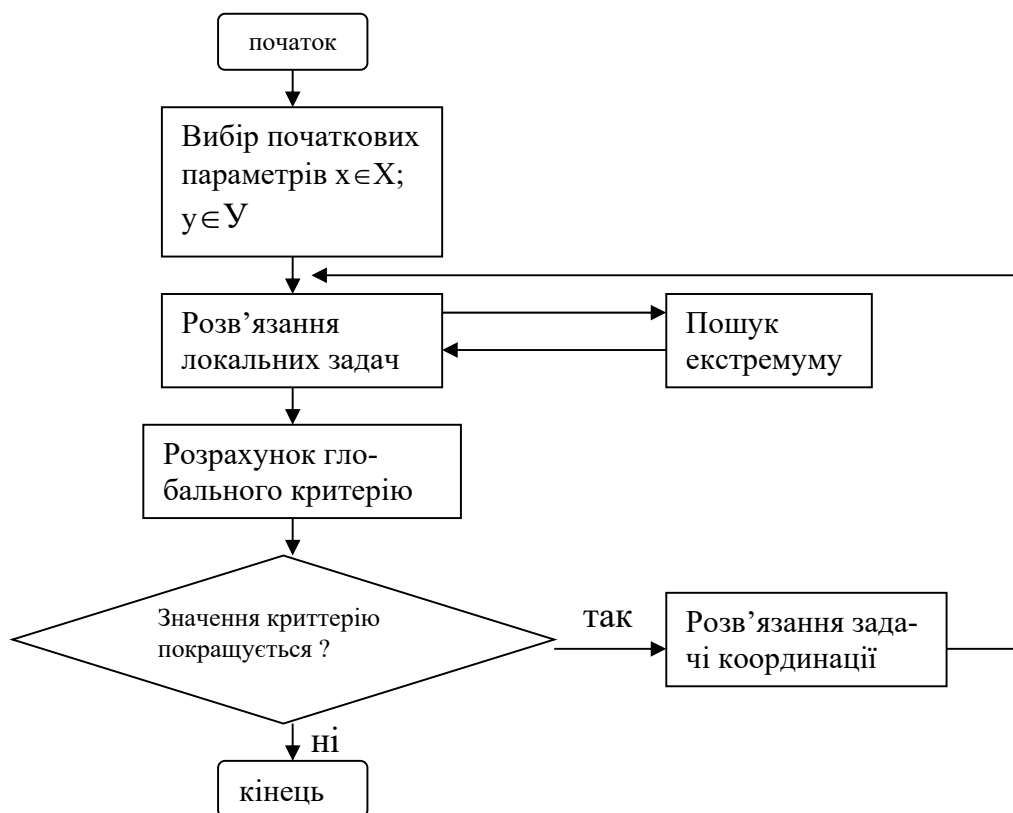


Рис.5.3. Блок-схема алгоритму управління ТК з розв'язуванням задач оптимізації підсистем та координації їх роботи.

На рис.5.3. показано блок-схема ітераційного алгоритма координації підсистем ТК.

Цей алгоритм враховує попередні вимоги до процедур координації працює таким чином:

1. Для кожної з підсистем визначається набір координат стану та змінних взаємодії довільно, виходячи з обмежень в межах технологічного режиму.
2. Незалежно одна від другої розв'язуються локальні задачі оптимізації підсистем з використанням даних, які отримано в п.1. Передбачається, що для кожної з підсистем існує задача оптимізації зі своїми критеріями, моделями та обмеженнями.
3. При існуючих обмеженнях та математичних моделях визначається функція ефективності для всього ТК.
4. Формується вектор змінних взаємодії підсистем.
5. Оцінюється функція ефективності ТК з отриманими значеннями змінних взаємодії підсистем.
6. Перевіряються умови зупинки процедур координації.

Якщо  $I_{TK}^{(n)} - I_{TK}^{(n-1)} \leq \varepsilon$  ( $n$  – крок ітерації,  $\varepsilon$  - константа), робота алгоритма припиняється.

7. При невиконанні умови п.6. здійснюється нова ітерація, в протилежному випадку змінні взаємодії підсистем вважаються оптимальними.

Використання наведеного алгоритму має ряд особливостей. Для прискорення процесу збіжності доцільно в кожній наступній ітерації крок змінних взаємодії зменшувати вдвічі.

При практичній реалізації алгоритмів координації необхідно враховувати, що математичні моделі та функції мети для кожної з підсистем ТК є функціями багатьох змінних, часто невивипуклими, що затруднює попередню оцінку збіжності цих алгоритмів. Як було показано раніше, головною умовою використання цих алгоритмів є коректність загальної задачі управління ТК.

В першу чергу необхідно оцінити існування розв'язку задачі координації. Якщо для всіх підсистем ТК функції мети

$$\varphi_i = \varphi_i(U_i, Y_i), i = (1, N) \quad (5.4)$$

та математичні моделі

$$y_i = f_i(U_i, Y_i), i = (1, N) \quad (5.5)$$

неперервні на множині значень аргументів  $U_i \times Y_i$  та в цій області існує хоча б одне рішення задачі управління підсистем, то в цьому випадку існує і розв'язок загальної задачі управління ТК. Це впливає з теореми про існування оптимального дискретного управління. Крім того, коли при реалізації алгоритмів координації значення одного з параметрів виходить за межі обмежень, формуються повідомлення та зупиняється робота алгоритма.

Значно впливає на реалізацію алгоритмів координації і наявність обчислювальних похибок. Крім того, точне рішення задачі можливе лише при нескінченному числі ітерацій. Оцінюючи стійкість алгоритма, вважають, що існує таке число  $\xi$ , якого не перевищують обчислювальні похибки, що не змінює збіжність алгоритма.



При реалізації алгоритмів координації обчислювальні похибки виникають при:

- знаходженні екстремумів функцій мети  $\varphi_i(U_i, Y_i)$ ;
- реалізації математичних моделей;
- визначенні комплексу змінних взаємодії підсистем  $Y_i$ .

При розробці та реалізації алгоритмів координації для конкретних ТК виникає ряд додаткових особливостей та умов. Так, наведений алгоритм розроблено в припущенні, що для кожної з координуємих підсистем виконується умова:

$$\dim U_i \geq \dim Y_i \quad (5.6)$$

Для різних ТК ця умова в загальному випадку не виконується (кількість управляючих діянь менша кількості вихідних змінних взаємодії підсистем). Це може призвести до того, що підзадачі нижнього рівня будуть некоординуємими відносно координатора, оскільки в цих підсистемах управління  $U_i$  буде однозначно визначатись вхідними та вихідними змінними.

При управлінні такими ТК можна використовувати метод цін. В цьому методі координуючими діями є множники Лагранжа, а підзадачі нижнього рівня полягають в оптимізації модифікованої функції мети підсистеми як по управляючим діям, так і по вхідним змінним підсистеми. В той же час область застосування такого підходу суттєво обмежена класом функцій, які описують підсистеми, а також умовами існування сідлової точки функції Лагранжа. Може виникнути також ситуація, коли при розв'язанні задач великої розмірності в реальному часі результатами на проміжних ітераціях будуть неузгоджені змінні взаємодії, що не приводить до покращення роботи координуємих підсистем.

Постановка задачі координації та її реалізація виконується при обмеженнях на управляючі діяння:

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad i=\overline{(1,N)} \quad (5.7)$$

що визначає допустимий діапазон зміни  $U_i$  за конструктивними та технологічними умовами. При розв'язанні задачі координації можливий випадок, коли змінні будуть на межі області. Для цього випадку необхідно додатково дослідити умови координуємості та сумісності.

Таким чином, алгоритми координації для ТК повинні враховувати такі вимоги:

- розв'язок загальної задачі повинен бути результатом рішення ряду відносно простих підзадач, що дає можливість подолати труднощі, пов'язані з великою розмірністю задачі;
- при використанні ітеративних алгоритмів координації кожна наступна ітерація покращує показники ефективності функціонування ТК, що дає можливість управління в реальному часі та зменшує витрати машинних ресурсів;
- алгоритми координації повинні використовувати, по можливості, лише один нижній рівень математичних моделей підсистем ТК, що суттєво спрощує процедуру ідентифікації цих моделей. Для агрегування та дезагрегування змінних в загальній задачі управління ТК використовуються прості допоміжні залежності;
- при реалізації алгоритмів координації повинен бути незначним вплив евристичних прийомів.

Суттєво впливає на ефективність алгоритму і вибір методу оптимізації. Для запобігання "зависання" в численних ітераціях для пошуку оптимального рішення при визначенні режимів роботи

підсистем рекомендуються модифікований метод Бокса та симплексний метод Нелдера-Міда, для знаходження глобального критерія - метод приведенного градієнта.

[1, с. 86-97, 2, с.218-245]

### **Контрольні питання**

1. Сформулюйте постановку задачі координації підсистем в складній системі управління
2. Які існують принципи координації?
3. В чому полягають умови сумісності підзадач в ієрархічній системі?
4. Як відбувається координація в двохрівневій системі
5. Що таке процедури координації?
6. Охарактеризуйте ітераційний алгоритм координації
7. Наведіть приклад координації функціонування підсистем технологічного комплексу
8. Як визначається кількість підсистем технологічного комплексу в задачі координації?

### **6. Моделювання процесу функціонування складних систем управління**

В технічній літературі склалось ряд підходів до формалізації процесу функціонування ієрархічних систем управління :

теоретико-множинний, який використовує відображення між множинами вхідних та вихідних векторів об'єкта та системи управління;

теоретико-ігровий, що полягає у використанні ігрових правил підсистемами управління на різних рівнях ієрархії;

підхід, заснований на декомпозиційних методах математичного програмування.

Для опису процесу функціонування системи управління ТК неперервного типу жоден з наведених підходів повною мірою не підходить, так як рішення представляються надто громіздкими та незручними. Зокрема використання декомпозиційних методів є найбільш уживаним для розв'язання задач управління складними ТК, однак представлення процесу функціонування системи в просторово-часовій області уявляється надто складним, особливо з урахуванням неповної апіорної інформації про об'єкт та децентралізації управління. Особливого значення набувають питання представлення опису процесу функціонування систем управління у зв'язку з поставленою задачею оптимізації їх структури. З цієї точки зору за основу можна взяти підхід, коли основним елементом формального опису процесу функціонування систем управління ТК є поняття підзадачі.

### **6.1 Формальний опис процесу функціонування ССУ**

Технологічний комплекс, являє собою сукупність керованих підсистем  $\{P_i\}$ . Кожна з яких характеризується векторами стану  $X_i$ , вихідних змінних  $Y_i$ , збурень  $Z_i$ , управлінь  $U_i$ . В складі  $U_i$  є як управління з боку "власної" системи, так і з боку координатора. В ТК можуть бути байпасні та зворотні зв'язки, які враховуються змінними

взаємодії між підсистемами. Кожна з підсистем оцінюється показником ефективності  $\varphi_i$ .

Підзадачею управління підсистемою  $P_i$  на часовому інтервалі  $\tau \leq t \leq \tau+h$  є процес пошуку управління  $U_i(t)$ , яке забезпечує оптимум функціонування  $\varphi_i$  тобто:

$$J_i = \int_{\tau}^{\tau+h} \varphi_i(U_i, Z_i, Y_i, t) dt \rightarrow opt \quad (6.1)$$

при виконанні обмежень, які враховують взаємодію підсистем та особливість функціонування. Тоді зрозуміло, що при управлінні ТК в цілому обов'язково повинна бути підзадача координації. Таким чином, можна визначити сукупність:

$${}^{(n)}Z_{TK\tau} = \left\{ {}^{(n-1)}Z_{i\tau}, {}^{(n)}Z_{K\tau} \right\}, i \in {}^{(n-1)}J \quad (6.2)$$

де:  ${}^{(n)}Z_{TK\tau}$  - задача управління ТК на n-му рівні;

${}^{(n-1)}Z_{i\tau}$  - підзадачі управління підсистемами;  ${}^{(n)}Z_{K\tau}$ , - підзадача координації.

Коли управління підсистемами  $\{P_i\}$  достатньо складні, то кожен з них в свою чергу можна зобразити додатковою множиною більш простих підсистем:

$$P_i = \{P_{\gamma_i}\}, \gamma_i \in {}^{(n-2)}J_i \quad (6.3)$$

де:  ${}^{(n-2)}J_i$  - множина порядкових індексів управляємих підсистем, які входять в склад  $\{P_i\}$ .

Тоді:

$$^{(n)}\mathcal{Z}_{i\tau} = \left\{ ^{(n-2)}\mathcal{Z}_{\tau i}, ^{(n-1)}\mathcal{Z}_{k\tau i} \right\}, \gamma_i \in ^{(n-2)}J_i \quad (6.4)$$

Таким чином, можна розкласти і далі загальну задачу, виділяючи більш мілкі підсистеми. Вираз тоді набуває вигляду:

$$^{(n)}\mathcal{Z}_{TK\tau} = \left\{ ^{(n-2)}\mathcal{Z}_{\tau i}, ^{(n-1)}\mathcal{Z}_{k\tau i}, ^{(n)}\mathcal{Z}_{K\tau} \right\}, \gamma_i \in ^{(n-2)}J_i \quad (6.5)$$

Процес розкладання на мілкі підсистеми можна продовжувати до того часу, коли з однієї сторони це зручно, а з іншої - до визначення елементарної підсистеми, тобто такої, для якої існує та визначена підзадача  $^{(1)}\mathcal{Z}_{i\tau}$ . Структура підзадач має такі властивості:

загальна задача управління розкладена на ряд послідовно підпорядкованих задач (вертикальна декомпозиція);

взаємозв'язки між підзадачами нижнього рівня обираються (визначаються), виходячи з умов розв'язання задачі верхнього рівня (пріоритет дії підзадачі верхнього рівня) ;

розв'язання підзадачі верхнього рівня в свою чергу залежить від задач нижнього рівня.

Наявність сукупності підзадач приводить до важливого висновку: кожна із підзадач для управління ТК необхідно розв'язати на визначений момент часу, щоб управління могли реалізуватись в підсистемах. Це значить, що, наприклад, в трьохрівневій системі в просторово-часовій області необхідно використати множину підзадач першого  $^{(1)}\mathcal{Z}$ , другого  $^{(2)}\mathcal{Z}$ , та третього  $^{(3)}\mathcal{Z}$  рівнів з урахуванням їх багатократного розв'язання на певному часовому інтервалі.

При управлінні технологічними комплексами необхідно враховувати, що підсистеми зв'язані між собою не тільки в просторі, а й в часі, оскільки поточний стан кожної з підсистем визначається управляючими діями в попередні моменти часу. Оскільки між підзадачами на інтервалі управління існують часові зв'язки, то узгодження цих підзадач можливе також лише за умови узгодження (координації) в часі та  $(j+1)$ -му рівні ієрархії. ,

Таким чином, кожна з підзадач управління визначається трьома координатами: рівнем ієрархії, порядковим індексом підсистеми (або їх множини) та часом розв'язання. Це може бути представлено графом в трьохвимірному просторі. Вершинам графа відповідають задачі, а дугам - координуючі дії.

Важливо відзначити, що при такому представленні задачі нового змісту набуває децентралізація управління, а саме:

кожна з підзадач управління може розв'язуватись незалежно від інших в будь-який обраний момент часу на інтервалі, який відповідає періоду розв'язання підзадач верхнього рівня;

при розв'язанні підзадач можуть використовуватись різні критерії ефективності, які найкраще відповідають загальній меті управління;

періоди розв'язання підзадач обираються незалежно, тому можлива оптимізація інформаційного процесу в ієрархічній системі управління за рахунок розподілення обчислювальної потужності технічних засобів (ЕОМ).

## 6.2 Опис процесу функціонування ієрархічної системи управління ТК

Будемо вважати, що ТК складаються з  $N$  підсистем. Серед вихідних змінних підсистем є такі, що відображають зв'язки підсистем з навколишнім середовищем та не являються змінними взаємодії підсистем. В загальному випадку компоненти векторів  $X, Y, Z, U$  мають обмеження у вигляді нерівностей типу:

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max}, \text{ або } X \leq X_{\text{дон}}, \text{ або } X \geq X_{\text{дон}}$$

чи рівностей. При управлінні ТК враховуваться також проміжні ємності, мережі трубопроводів, тощо.

Як було показано вище, загальний показник функціонування ТК на часовому інтервалі  $0 \leq t \leq T$ , коли він має зміст технологічної складової прибутку, можна представити у вигляді:

$$J = \int_0^T \sum_{i=1}^N \varphi_i(Y_i(t), X_i(t), U_i(t), Z_i(t), t) dt \quad (6.6)$$

Таким чином, критерій ефективності ТК - адитивна функція критеріїв ефективності підсистем. Для кожної з підсистем критерій ефективності можна представити в вигляді:

$$J = \int_0^T (\Pi_y Y_i(t) - \Pi_{\Pi} U_{it}(t) + \Pi_{y_{qi}} Y_{qi}(t)) dt \quad (6.7)$$

де:  $Y_{qi}(t)$  - змінні взаємодії з  $q$ -ої підсистеми на  $i$ -ту;

$\Pi_y, \Pi_{\Pi}$  - коефіцієнти вартості, які враховують ціни потоків  $Y$  та  $U$ .

В процесі роботи ієрархічної системи управління визначення управляючих діянь здійснюється в дискретні моменти часу при розв'язанні підзадач першого рівня  ${}^{(1)}Z_{it}$ , при цьому в загальному



випадку підзадачі розв'язуватися з різними періодами  ${}^{(1)}\tau_i$  для різних підсистем комплексу  $\{P_i\}, i=(1,N)$ . Тоді показник ефективності можна записати в формі:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{m_i=0}^{\theta_i-1} \int_{t_{mi}}^{t_{mi}+\tau_i} \varphi_i(Y_i(t), X_i(t), U_i(t), Z_i(t), t) dt \quad (6.8)$$

де:  $t_{mi}$  - дискретні моменти часу, в які розв'язуються підзадачі  ${}^{(1)}z_{mij}$ .

$${}^{(1)}T_i = \{t_i\}, \quad m_i = (0, \theta_i - 1), \quad \theta_i = \frac{\tau}{{}^{(1)}\tau_i}$$

З урахуванням дискретизації часу математичні моделі ТК часто - записують в вигляді різницевих рівнянь:

$$Y(t_{s+1}) = y(t_s) + f(y(t_s), U(t_s), Z(t_s), X(t_s), t_s) \Delta \quad (6.9)$$

де:  $t_s = s\Delta, \quad s = 1, 2, 3K$ .

$\Delta$  - достатньо малий крок дискретизації часу;

$y$  - вектор, який включає вихідні змінні підсистем:

$$Y = \{Y_{ij}\}, \quad i, j = \overline{(1, N)}.$$

Опис динамічних об'єктів в кінцево-різницевій формі на сьогодні є загальноприйнятим, якщо векторна функція  $f$  неперервна разом з частинними похідними першого порядку. Використання кінцево-різницевої апроксимації систем диференціальних рівнянь, які описують неперервні процеси, приводить до задачі нелінійного програмування, розв'язок якої в загальному випадку може відрізнятись від розв'язку початкової задачі оптимального управління неперервним об'єктом. Виникає проблема дослідження збіжності кінцеворізницевої апроксимації до рішення початкової задачі.

Показано, що збіжність траєкторії дискретної апроксимації  $\bar{Y}(t)$  до траєкторії в смислі різниці векторів

$$\max |Y(t) - \bar{Y}(t)| \rightarrow 0 \quad \text{при } \Delta \rightarrow 0 \quad \text{для випадку, коли } U(t), Z(t) - 0 \leq t \leq T$$

кусочно-неперервні функції, а вектор-функція  $f(Y(t), U(t), X(t), Z(t), t)$  задовольняє умові Ліпшиця стосовно своїх аргументів (як відомо, умова Ліпшиця входить у формулювання теореми про існування та єдність рішень диференційного рівняння). При  $\Delta \rightarrow 0$  доказана збіжність по функціоналу, коли відсутні обмеження на координати стану і оптимальне управління в задачі різницевої апроксимації є кусочно-постійним в результаті до визначення дискретних значень  $\{U(t_m)\}$ ,  $m = (0, \theta - 1)$  на інтервалі розв'язання задачі  $[0, T]$ .

В реальних системах оперативної оптимізації неперервних об'єктів на основі кінцево-різницевої апроксимації диференціальних рівнянь, які розв'язуються за допомогою ЕОМ, величина кроку дискретизації  $\Delta$  завжди має кінцеве значення ( $\Delta \neq 0$ ), тому розв'язок задачі завжди наближений.

Вираз може набути більш простої форми в результаті переходу від інтегралу до суми:

$$J\Delta = \sum_{i=1}^N \sum_{mi=0}^{mi=\theta-1} J_{mi} \quad (6.10)$$

де:

$$J_{ki} = \Delta \sum_{q \neq 0}^{q_i \eta - 1} \varphi_i(Y_i(t_{mi} + q_i \Delta), U_i(t_{mi} + q_i \Delta), X_i(t_{mi} + q_i \Delta), Z_i(t_{mi} + q_i \Delta), t_{mi} + q_i \Delta),$$

$$\eta_i = \frac{{}^{(1)}\tau_i}{\Delta} \quad (6.11)$$

Загальна задача оптимального управління на часовому інтервалі  $T = \tau$  полягає в забезпеченні показника ефективності в просторі

управлінь  $\{U_i(t_{mi} + q_i \Delta)\}$ ,  $m_i = \overline{(0, \theta_i - 1)}$ ,  $q_i = \overline{(0, \eta_i - 1)}$ ,  $i = \overline{(1, N)}$  при існуючих обмеженнях, оцінках збурень  $\{Z_i(t_{mi} + q_i \Delta)\}$ ,  $m_i = \overline{(0, \theta_i - 1)}$ ,  $q_i = \overline{(0, \eta_i - 1)}$ ,  $i = \overline{(1, N)}$ , а також параметрах математичних моделей підсистем, які визначають розв'язок задач.

Щодо функцій  $f$ , які описують управління підсистеми та залежностей - для визначення показників ефективностей, то їх можна вважати неперервними, нелінійними в області допустимих значень, що визначаються обмеженнями, та такими, що мають неперервні частинні похідні.

Якщо припустити, що змінні взаємодії підсистем задані, то загальну задачу управління ТК можна представити у вигляді множини незалежних підзадач  $\{{}^{(1)}\mathcal{Z}_{mi}\}$ ,  $m_i = \overline{(0, \theta_i - 1)}$ ,  $i = \overline{(1, N)}$  оптимального управління підсистемами ТК  $\{P_i\}$ ,  $(i = \overline{1, N})$ . При цьому кожна із підзадач  ${}^{(1)}R_{mi}$  полягає в досягненні показником ефективності  $J_{mi}$  екстремуму на часовому інтервалі  $t_{mi} \leq t \leq t_{mi} + \eta_i \Delta$  при існуючих обмеженнях та значеннях змінних  $Y$  та  $X$  та оцінках збурень  $Z$ .

Таким чином, характерними ознаками підзадач  ${}^{(1)}Z_{mi}$  є:  
 підзадачі розподілені як в просторі, так і за часом;  
 підзадачі можуть розв'язуватись незалежно одна від одної, якщо  
 задано умови, викладені вище;

постановка підзадач  ${}^{(1)}Z_{mi}$  отримана формальним шляхом на  
 основі декомпозиції загальної задачі  $Z_{TK}$ .

Для розв'язання загальної задачі  $Z_{TK}$  на основі розв'язків  
 підзадач  $\{ {}^{(1)}Z_{mi} \}$  необхідно попередньо знайти оптимальні за  
 загальним критерієм значення змінних взаємодії підсистем, тобто  
 розв'язати задачу координації  ${}^{(2)}Z_K$  підзадач  ${}^{(1)}Z_{mi}$ .

Таким чином підзадачі  $\{ {}^{(1)}Z_{mi} \}$ ,  $m_i = \overline{(0, \theta_i - 1)}$ ,  $i = \overline{(1, N)}$  та підзадача  
 ${}^{(2)}Z_K$  створюють двоохріпневу ієрархічну структуру  ${}^{(2)}Z$  підзадач  
 управління ТК в складі підсистем  $\{ P_i \}$ ,  $i = \overline{(1, N)}$ :

$${}^{(2)}Z = \{ {}^{(2)}Z_K, {}^{(1)}Z_{mi} \}, \quad m_i = \overline{(0, \theta_i - 1)}, \quad i = \overline{(1, N)} \quad (6.12)$$

Розв'язок кожної з підзадач  ${}^{(1)}Z_{mi}$  реалізується у вигляді управлінь  
 $U_i(t_{mi} + q_i \Delta)$ ,  $q_i = \overline{(0, \eta_i - 1)}$  в моменти часу  $\{ t_{mi} + q_i \Delta \}$ ,  $q_i = \overline{(0, \eta_i - 1)}$ . Підзадача  
 ${}^{(2)}Z_K$  розв'язується при  $t=0$  на весь часовий інтервал роботи системи  
 ${}^{(2)}\tau$ , а підзадачі  ${}^{(1)}Z_{mi}$  - відповідно в моменти  $\{ t_{mi} \}$ ,  $m_i = \overline{(0, \theta_i - 1)}$ ,  
 $i = \overline{(1, N)}$ .

Аналогічну структуру можна отримати для ієрархічної системи з числом рівнів, більшими двох.

### **6.3. Агрегативні моделі функціонування великих систем управління**

Основою формалізації процесу функціонування ССУ (як і інших складних систем) є положення:

- будь-яка система функціонує в часі , взаємодіючи із зовнішнім середовищем, і в кожний момент часу може знаходитись в одному з можливих станів;

- на вхід системи поступають (можуть поступати) вхідні сигнали;
- система може видавати (формувати) вихідні сигнали;
- стан системи в даний момент визначається попередніми станами та вхідними сигналами, які поступають в даний момент часу і раніше;
- вихідний сигнал в даний момент часу визначається станами системи та вхідними сигналами, які відповідають даному та попереднім станам.

Названі положення формалізуються таким чином:

1. Множина елементів часу, в якій розглядається функціонування системи  $t \in T$ . Множина  $T$  в загальному випадку є підмножиною дійсних чисел і може бути неперервними, дискретним чи дискретно-неперервним.

В дискретному часі функціонують: кінцеві автомати; ЕОМ, МПК.

В неперервному: АСУ ТП; електричні системи

В дискретно-неперервному:

ієрархічні СУ: на нижньому рівні – неперервні, на верхньому – дискретні.

Функціонування в часі - процес переходу системи із стану в стан.

Множина станів  $Z$ :

- сукупність станів системи, яка визначається множиною станів елементів системи. Якщо кожен з елементів може бути в двох станах, то система з  $n$ -елементів може знаходитись в одному з  $2^n$  станів (стан дискретних автоматів, стан стосовно надійності)

$$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_i, Z_n), z \in Z \quad (6.13)$$

- дискретні стани.

Стан системи характеризується деяким невід'ємним числом

$$Z(z=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (6.14)$$

Наприклад – аналіз складних інформаційних систем з однією фазою обслуговування. Тоді  $Z$  – кількість задач, запитів, які знаходяться в системі (на обслуговуванні або в черзі).

Стан системи описується набором цілих невід'ємних чисел.

$$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_i, Z_r), Z_i = 0, 1, 2, \dots \quad (6.15)$$

$Z_i$  – число вимог в  $i$ -фазі;  $r$  - число фаз

Це: динаміка багатофазних, багатоетапних систем типу телеавтоматичних систем масового обслуговування.

Стан системи описується набором дійсних чисел – вектором фазових координат.

В загальному випадку вважають, що стан системи  $Z$  описується деяким набором характеристик  $Z_i$ :

$$Z_i \in Z_i (i=1, 2, \dots, k), \quad (6.16)$$

$Z_i$  – задані множини, а множина можливих станів складної системи визначається як прямий добуток множин  $Z_i$ :

$$Z = Z_1 \times Z_2 \times \dots \times Z_i \times \dots \times Z_k \quad (6.17)$$

Множина станів  $Z$  системи співпадає з простором координат стану  $X$ . Тоді в кожний момент часу стан  $Z(t)$  є точка в евклідовому просторі з координатами  $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$ .

2. Множина вхідних сигналів  $u \in U_0$  для даного моменту  $U(t)$   $t \in T$ . Вхідний сигнал описується набором характеристик

$U_i \in U_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ),  $U_i$  – задані дискретні чи неперервні множини

Прямий добуток:

$$U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_i \times \dots \times U_m \quad (6.18)$$

- простір вхідних сигналів, а сигнал  $U$  – точка простору  $U$  з координатами  $U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_m$

Відображення  $u=L(t)$  – вхідний процес

3. Вихідні сигнали  $y \in Y_0$  ( $Y_0$  – множина вихідних сигналів). Якщо вихідний сигнал  $y$  описати набором характеристик

$y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n, \quad y_i \in Y_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),

$Y_i$  – задані множини, то прямий добуток

$$Y = Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_i \times \dots \times Y_n$$

- простір вихідних сигналів ( $y_0 \subset Y$ )

Можна вводити в розгляд вихідний процес  $y=M(t)$ .

В класі великих СУ розглядаються системи без післядії – системи, майбутня поведінка яких визначається даним станом і не залежить від передісторії, тобто того, яким чином система прийшла в цей стан.

Для детерміністських систем їх динаміка задається оператором переходів  $H$  та оператором виходів  $G$ .

Оператор переходів  $H$  визначає динаміку переходів системи із стану в стан:

$$Z(t)=H\{t_0, t, z(t_0), (t,x_L]_{t_0}^t\} \quad (6.19)$$

$z(t_0)$  – початковий стан;  $z(t_0) \in Z$ ,  $t_0 \in T$ ,  $t \in T$ ;

$\{(t,x_L]_{t_0}^t\}$  – множина можливих ділянок вхідного процесу  $x=L(t)$  на інтервалі  $(t_0,t]$

При фіксованих  $t_0, z(t_0), (t,x_L]_{t_0}^t$  оператор  $H$  реалізує відображення  $Z=H(t)$  або  $Z=Z(t)$  – рух системи, а множина рухів –  $\{Z(t)\}$ .

Сукупність впорядкованих пар  $(t,z)$  для всіх  $t \in T$ , де  $z$  визначається рухом  $Z=Z(t)$  – фазова траєкторія системи.

Сукупність точок простору  $Z$ , які відповідають як відображення  $Z=Z(t)$  всім  $t \in T$  – траєкторія системи в просторі станів.

Таким чином, вхідний процес  $x(t)$  можна розбити на окремі ділянки і аналізувати поведінку системи на кожній з них.

Оператор виходів системи  $G$  визначає динаміку вихідних сигналів:

$$Y(t)=G\{t,t_0,z(t_0),(t,U_L]_{t_0}^t\}=G\{t,z(t)\} \quad (6.20)$$

Зовнішня схожість операторів  $H$  і  $G$  не повинна приховувати їх відмінності. Оператор  $H$  кожному  $t > t_0$  з множини  $T$  ставить у відповідність елемент з простору станів  $z \in Z$ . Але є системи, які видають вихідні сигнали не обов'язково в кожний момент  $t \in T$ . Щоб зменшити між ними відмінності, допускають, що множині  $Y_0$  належить і пустий сигнал  $Y_0$ , який фізично інтерпретується як відсутність вихідного сигналу в момент  $t$ .



Узагальнена динаміка ССУ описується об'єднаним оператором:

$$F=H \times G$$

- оператор функціонування, а сукупність точок  $\{z(t),y(t)\}$  простору  $Z \times Y$ , які відповідають всім  $t \in T$  – траєкторія функціонування.

Подібний підхід – для стохастичних систем.

На введених поняттях засновано агрегативний опис процесу функціонування складних систем. Агрегат – уніфікована структура, яка характеризується множинами  $T$ ,  $Z$ ,  $U$ ,  $Y$  та операторами  $H$  та  $G$ . Для оцінки функціонування агрегата вводиться стан  $z(t+0)$ , в який він може перейти за малий інтервал часу. Вид оператора  $H$  залежить від того, чи поступають на протязі цього інтервалу часу вхідні сигнали. Якщо в момент  $t_s$  в агрегат поступає сигнал, то:

$$Z(t_s+0)=H_1[t_s, Z(t_s), U(t_s)], t_s \in T \quad (6.21)$$

Якщо напівінтервал  $(t_s, t_{s+1}]$  не включає жодного моменту надходження вхідних сигналів, за винятком  $t_{s+1}$ , то

$$Z(t)=H_2[t_1, t_s, z(t_s+0)], t \in (t_s, t_{s+1}] \quad (6.22)$$

З множини станів  $Z$  агрегата виділяють підмножину  $Z^{(y)}$  для моментів видачі вихідного сигналу:

$$y(t^*)=G[t^*, z(t^*)] \quad (6.23)$$

Можливі також зміни стану в моменти видачі вихідних сигналів при виході  $Z(t)$  на межу підмножини  $Z^{(y)}$ , для чого вводиться оператор  $H_3$ :

$$z(t^*+0)=H_3[t^*, z(t^*)] \quad (6.24)$$

Сукупність операторів  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  задає оператор  $H$ , а оператори  $H$  та  $G$  повністю визначають модель функціонування агрегата. Тоді процес функціонування агрегата складається, в основному, з

стрибкоподібних змін стану в моменти надходження вхідних сигналів на видачі вихідних сигналів (оператори  $H_1$ ,  $H_2$ ) та змін стану між цими моментами (оператор  $H_3$ ).

Прикладом такого опису функціонування може бути складна система управління щодо надходження вхідних сигналів та чергових задач.

Для складних систем управління використовуються:

- агрегат як випадковий процес. В моменти надходження вхідних сигналів відбувається “регенерація” вхідного процесу, який описує функціонування агрегата, тобто розвиток цього процесу та після таких моментів не залежить від його передісторії;
- кусково-марківський агрегат, заснований на закономірностях марківських процесів;
- кусково-неперервні агрегати, які виділяються конкретизацією множин станів, входів та виходів, а також операторів переходів і виходів;
- кусково-лінійні агрегати, засновані на розв’язках диференціальних рівнянь.

За допомогою кусково-неперервних та кусково-лінійних агрегатів можна формалізувати різні реальні процеси: передачі та обміну даними в мережах; рух транспорту; зміни в системах масового обслуговування і т.д. В той же час представлення реальних систем у вигляді агрегатів неоднозначно, що значною мірою залежить від вибору фазових змінних. В будь-якому випадку необхідно забезпечити компроміс між точністю опису та повнотою отримуваної інформації і простотою моделі.

[1, с.98-108, 3, с.67-78, 5, с.94-108]

### **Контрольні питання**

1. В чому полягає процес функціонування складної системи?
2. Які існують підходи до формалізації процесу функціонування ієрархічних систем управління?
3. Як формально відображається процес функціонування складної системи управління?
4. Охарактеризуйте структуру підзадач управління в складній системі
5. Як описується процес функціонування системи управління технологічним комплексом?
6. Як формуються агрегативні моделі функціонування складних систем?
7. Дайте визначення поняттю “агрегат”.
8. Що таке оператори переходів і виходів?

## **7. Інформаційні характеристики ссу**

### **7.1. Інформація в задачах управління**

Історично поняття інформації пов'язане з набуттям нових знань в галузях науки: фізиці, філософії, біології, теорії зв'язку і інш. Спроби отримання об'єктивної інформації завжди наштовхуються на перешкоду, пов'язану з участю людини в експериментах, розробках моделей і т.д.

В 1877 р. Л.Больцман сформулював поняття ентропії як міру невизначеності. В 1946 р. К. Шенон побудував теорію інформації і виявилось, що термодинамічна ентропія Л. Больцмана та інформаційна ентропія К. Шенона описуються однаковими формулами, це підкреслює той факт, що системи різної природи мають загальні

властивості і закономірності, і це приводить до необхідності використання системного аналізу.

Для системного аналізу в процесі управління поняття інформації розширюється і трактується таким чином: як тільки стан одного об'єкта знаходиться у відповідності до стану іншого, то один об'єкт відображає другий, тобто містить інформацію про нього. Таким чином, інформація в принципі виникає тоді, коли об'єкт змінює свій стан.

Значення інформації в великих системах управління підкреслюється визначенням Колгоморова А.Н.: "кібернетика – наука, яка вивчає системи будь-якої природи, які здатні сприймати, зберігати та перероблювати інформацію, та використовувати її для управління."

Інформація на відміну від інших продуктів діяльності характеризується тим, що її споживання не приводить до руйнування, а комп'ютерне відтворення копії інформаційного продукту суттєво дешевше будь-якого масового виробництва копії будь-якого іншого товару.

Значення інформації в системах управління полягає в тому, що зменшення невизначеності завжди потребує додаткової інформації. Академік В.М.Глушков сформулював поняття інформаційних бар'єрів:

- перший - межа складності управління економічною системою перевищує можливості однієї людини. Тоді в складі компанії повинен бути спеціаліст, який володіє знаннями і бізнесу, і інформаційних технологій;

- другий - межа, коли складність задач управління системою перевищує можливості всіх людей, які приймають участь в цьому процесі.

В системному аналізі визначаються та досліджуються основні інформаційні характеристики ССУ: класифікація інформаційних потоків, кількість інформації, яка потрібна для зменшення невизначеності; зміна ентропії і інш.

В задачах управління складними об'єктами важливими є якісні (семантичні і прагматичні) характеристики інформації. Для їх отримання використовуються:

- статистичні методи, які відображають кількісну сторону інформаційних масивів (повідомлень), але недостатньо зв'язані з методами та умовами досягнення мети функціонування системи;
- методи класичної теорії управління, що використовують спеціальний формально-математичний апарат. В той же час в системному аналізі є ряд задач, які складно або неможливо формалізувати, наприклад, багатокритеріальні задачі оптимізації; прийняття рішень в умовах невизначеності і ін.

Інформаційний підхід в задачах системного аналізу проблем управління дає можливість оцінити ряд факторів, які мають невизначений, якісний та розмитий вид. Одна з головних задач – обґрунтування та вибір математичних залежностей, які дають можливість сформулювати бази даних для певної предметної області.

Інформація в складних системах управління проявляється в таких формах:

- інформація повідомлення

$$I_0 = I_0(S) + I_0(E) + I_0(Q_y) + I_0(U, Y) \quad (7.1)$$

де складовими відповідно є інформація про об'єктивні характеристики  $S$  (структура, властивості процесу), дестабілізуючих факторів  $E$  зовнішнього середовища, управління та входів і виходів системи;

-інформація перетворення

$$I_n = \sum_i I_{ni}, \quad i = \overline{1, 6} \quad (7.2)$$

Ця інформація зосереджена в структурі системи, її елементах та вузлах, базах даних та знань, а кількість функціональних підсистем відповідає типовому процесу переробки інформації (вимірювання; спостереження; ідентифікації; формування управлінь; координації; інформаційного обміну);

-перетворена інформація

$$I_{\text{ПР}} = \sum_i Q_{\text{ПР } i}, \quad i = \overline{1, 6} \quad (7.3)$$

Склад цієї інформації відповідає  $Q_n$ , але її форма забезпечує використання в конкретному місці в потрібний час;

- інформація про управління  $Q_u$  щодо реалізації контурів координатного, параметричного та структурного управління.

## 7.2.Класифікація та визначення видів інформації в ССУ

Поняття “інформація” має різні аспекти: від найбільш загального філософського (інформація - відображена різноманітність об'єктивного світу) до частинного прикладного (інформація-відомості, які є об'єктом переробки). В той же час закономірності отримання та перетворення інформації вивчені недостатньо, відсутній універсальний математичний апарат для опису цих процесів.

Уточнення змісту цього поняття приводиться таким чином:

1.Інформація в “широкому” сенсі – властивість об’єктів (процесів) навколишнього матеріального світу породжувати різноманітність станів, які через відображення передаються від одного об’єкта до другого (пасивна форма) та засіб обмеження різноманітності, тобто організації, управління, дезорганізації і ін. (активна форма).

Цей підхід, дозволяє:

- визначити інформаційні процеси як одну із властивостей об’єктивного світу;

- визначити наявність та необхідність урахування в складних СУ об’єктивних інформаційних характеристик (обмежень) обслуговуючих та обслуговуваних об’єктів (процесів) будь-якої фізичної природи як різних станів останніх та їх вплив та інформаційні характеристики суб’єктивних знань, які циркулюють між об’єктами, що можуть їх осмислити;

- використати інформацію як засіб обмеження різноманітності (управління) станів об’єктів (процесів), впливати на їх інформаційні характеристики.

В ССУ є два роди інформації (об’єктивна та суб’єктивна):

- внутрішня (перетворююча), яка міститься в структурах СУ, її елементах, алгоритмах, програмах - фізична величина;

- зовнішня відносна змістовна (вимірювальна, управляюча), а також науково-технічна, технологічна, економічна, яка вилучається з інформаційних потоків (повідомлень, команд)

2.Структурна інформація  $J_s(\theta)$  - відображена в знаковій формі організованість (складність, різноманітність) матеріальних об’єктів – систем  $\theta$ , яка є універсальною фізичною величиною, що використовується для опису процесів функціонування об’єктів.

$J_s$  - фізична величина, вона вимірювана, є алгоритм отримання її кількості  $J_s$ , об'єктивна, тобто  $J_s$  не залежить від користувача і не зменшується при наступних отриманнях її користувачами.

$J_s$ -внутрішня властивість СУ, що характеризує її структурно-інформаційний ресурс.

3. Змістовна інформація  $J_z (m, T)$  - сукупність даних (знань) про конкретний матеріальний об'єкт - систему, яка є в інформаційних масивах  $m \in M$  (масивах даних, програм, повідомленнях, фактах), які сприймаються отримувачем (людиною-оператором, інформаційним вузлом і ін.) і використовується для вироблення та прийняття управляючого рішення (прагматичний аспект) з урахуванням загальносистем-ного тезауруса  $T$ .

Тезаурус – повний систематизований набір даних про певну галузь знань, що дає можливість орієнтуватись в ній.

Наявність  $J_z (m, T)$  в системі дозволяє зменшити невизначеність (різноманітність) істинної ситуації і на цій основі зробити вибір одного чи декількох варіантів з множини рівноправних (однородних) альтернатив.

Важливою різновидністю змістовної інформації  $J_z$  є зв'язна  $J_{zc}$ , яка характеризує процеси взаємодії (взаємозв'язку) функціональних підсистем (елементів) ССУ.

4. Зв'язна інформація  $J_{zc} (p_m, T_c)$  – сукупність даних (знань) про конкретний процес взаємодії в ансамблі матеріальних об'єктів – систем, яка міститься в статистичних структурах

$P_{mi}$ ,  $i = \overline{1, n}$  заданої множини  $M$  інформаційних масивів (повідомлень), які сприймаються отримувачем (людиною –



оператором чи технічними засобами) та використовувана для визначення джерела інформації.

Наявність  $J_{zc}$  в системі дозволяє отримувачу зменшити наявну невизначеність (різноманітність) істинної ситуації (приписати їй більшу імовірність, чим вона мала раніше) і на основі цього зробити вибір одного інформаційного масиву з множини можливих.

Інформація повідомлення:

$$I_0 = I_z(m, T) \cup I_{zc}(p_m, T_c \subset T) \quad (7.4)$$

$I_z$  - змістовна інформація (семантична та прагматична);

$I_{zc}$  - зв'язна інформація (структурно-статистична);

Тоді інформація перетворювальна:

$$I_n = I_v(\theta) \cup I_z(T) \quad (7.5)$$

$I_v$  - структурна інформація;

$I_z$  - змістовна інформація.

Інформація прийняття рішень:

$$I_{np} = \varphi(I_o, I_n) \quad (7.6)$$

$m$ -інформаційний масив;

$P_m$ - апіорна ймовірність отримання інформаційного масиву;

$T, T_c$  – загальносистемний тезаурус і тезаурус підсистеми інформаційної взаємодії (обміну);

$\theta$  – кортеж параметрів системи (модель).

В ССУ інформація має різні види та якісні форми проявлення, тому для вимірювання інформаційного ресурсу (структурного та змістовного) потрібно використовувати множину (обґрунтовану сукупність) різних інформаційних мір, до яких пред'являються вимоги:

- адекватність (відповідність виду і якісній формі проявлення інформації);
- узгодженість (відображення специфіки предметної області, тобто функціональної підсистеми СУ та реалізуемого в ній технологічного процесу переробки інформації);
- ефективність (алгоритмічна, регулярна обчислюваність);
- адитивність (забезпечення, визначення сукупного інформаційного ресурсу СУ як суми кількостей інформації);
- зрозумілість (припущення раціональної інформаційної інтерпретації).

Використання обгрунтованої сукупності (комплексу) інформаційних мір з заданими вимогами до конкретної СУ дозволяє реалізувати 3-х-екстремальний принцип раціональності переробки інформації в СУ:

$$I_n \overset{*}{\Rightarrow} I_o^* \rightarrow U_G^* | I^0 \quad (7.7)$$

- інформаційний ресурс СУ  $Q_n$  необхідно використати оптимальним способом (\*) і лише для преробки найбільш цінної (якісної) інформації  $Q_v^*$ , на основі якої дійсно можливе вироблення оптимальних упралінь  $U_G^*$  при обмеженні на кількість інформації  $J^0$ .

Спосіб використання інформаційного ресурсу СУ- спеціальна інформаційна технологія як сукупність інформаційних процедур формування (рецепції), інтерпретації (перетворення, пошуку, реорганізації) та комунікації (передачі, збереження) інформації.

Якість інформації в СУ - сукупність властивостей інформ-ації, яка характеризує ступінь її відповідності потребам користувачів (операторів, персонала). Якість можна розглядати як внутрішню

(властиву власне інформації і зберігаєму при її переносі в іншу СУ, підсистему) та зовнішню:

-змістовність (значущість, ідентичність, гомоморфізм, кумулятивність, повнота, вибірковість);

-захищеність (достовірність, істинність, безпомилковість, захищеність, перешкодостійкість, перешкодозахищеність, цілістність, оперативність, своєчасність, готовність, конфіденційність, доступність,...)<sup>1</sup>

### 7.3. Ентропія та її змінювання в складних системах

При вивченні сигналів в каналах систем (чи просто в системах) прешим специфічним поняттям є невизначеність випадкового сигналу, для якої введена кількісна міра – ентропія.

Наприклад: якщо деяка подія може відбутись з вірогідністю 0,99 (тобто не відбутись з вірогідністю 0,01), а для іншої події ці оцінки 0,5 та 0,5, то для другого випадку краще утриматись від прогнозів- велика невизначеність.

Міра невизначеності повинна бути числовою характерис-тикою, функціоналом від розподілення.

Для об'єкта А з кінцевою множиною можливих сигналів  $A_1, \dots, A_n$  з відповідними ймовірностями  $p_1, \dots, p_n$  мірою невизначеності приймають ентропію.

$$H(A) = H(\{p_i\}) = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (7.8)$$

---

<sup>1</sup> Примітка: кумулятивність – накопичуваність

Гомоморфізм – однозначна відповідність структур об'єктів, які порівнюються

р-щільність розподілення для випадкової величини.

Властивості функціонала (як міри невизначеності):

1.  $H(p_1, \dots, p_n) = 0$ , лише тоді, коли будь-яке одне з  $\{p_i\} = 1$  (решта нулі).

Це відповідає випадкові, коли результат можна передбачити наперед з повною достовірністю, тобто коли відсутня будь-яка невизначеність. У всіх інших випадках ентропія позитивна (додатня). Ця властивість перевіряється безпосередньо.

2.  $H(p_1, \dots, p_n)$  сягає найбільшого значення при  $p_1 = p_2 = \dots = p_n = \frac{1}{n}$

- випадок найбільшої невизначеності. Варіація  $H$  по  $p_i$  за умови  $\sum p_i = 1$  дає  $p_i = \text{const} = \frac{1}{n}$

3. Якщо  $A$  і  $B$  - незалежні випадкові об'єкти, то

$$(A \cap B) = H(A) + H(B) \quad (7.9)$$

4. Якщо  $A$  і  $B$  - залежні випадкові сигнали то:

$$H(A \cap B) = H(A) + H(B|A) = H(B) + H(A|B), \quad (7.10)$$

де умовна ентропія  $H(B|A)$  визначається як математичне сподівання ентропії умовного розподілення.

5. Існує нерівність:

$$H(A) \geq H(A|B), \quad (7.11)$$

що узгоджується з інтуїтивним уявленням про те, що знання стану об'єкта  $B$  може лише зменшити невизначеність об'єкта  $A$ , а якщо вони незалежні, то залишить її незмінною.

Цікава особливість: для оберненої задачі, тобто при бажаних властивостях міри невизначеності знайти функціонал з вказаними

властивостями – лише умови 2 та 4 дозволяють розв'язати задачу однозначно (з точністю до постійного множника).

Диференційна ентропія: дає можливість узагальнити міру невизначеності на неперервні випадкові сигнали:

$$h(x) = - \int_x p(x) \log p(x) dx \quad (7.12)$$

Це аналог ентропії дискретної величини, але умовний, відносний. Смисл: начебто порівнюється невизначеність випадкової величини з щільністю розподілення  $p(x)$  з невизначеністю випадкової величини, рівномірно розподіленої в одиничному інтервалі, тому  $h(x)$  на відміну від  $H(x)$  може бути не тільки додатньою. Міняється також  $h(x)$  у випадках нелінійних перетворень шкали  $x$ , що в дискретному випадку значення не має, решта - аналогічно.

Практичне використання: якщо при деяких обмеженнях на випадкову величину необхідно задати конкретне розподілення, то використовується принцип максимуму ентропії: із всіх розподілень, які відповідають існуючим обмеженням, рекомендується обирати ті, які мають максимальну диференційну ентропію. (Тобто максимум ентропії гарантує найбільшу невизначеність, пов'язану з тим, що ми маємо справу з найгіршим випадком за даних умов).

Для випадкового процесу з дискретним часом та дискретною кінцевою множиною можливих станів ентропія пов'язана з його фундаментальними властивостями.

Назвемо кожен стан процесу символом, множину можливих станів - алфавітом, їх число  $m$ -об'ємом алфавіта. Число можливих послідовностей довжини  $n$  дорівнює  $m^n$ , а появу конкретної

послідовності можна розглядати як реалізацію однієї з  $m^n$  подій. Знаючи ймовірності символів та умовні ймовірності появи наступного символу, якщо відомий попередній (у випадку їх залежності) можна обчислити ймовірність  $P(c)$  для кожної послідовності  $C$ . Ентропія множини  $\{C\}$ , за визначенням:

$$H_n = - \sum_{c \in \{c\}} p(c) \log p(c) \quad (7.13)$$

Для стаціонарного випадкового процесу ентропія

$$H = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{H_n}{n} \quad (7.14)$$

На множині  $\{C\}$  можна задати будь-яку числову функцію  $f_n(C)$ , яка є випадковою. Визначимо:

$$f_n \log p(C) \quad (7.15)$$

а математичне сподівання цієї функції

$$M[f_n(C)] = \sum_C p(C) f_n(c) = - \frac{1}{n} \sum_c p(C) \log p(C) \quad (7.16)$$

Тоді,

$$M \left[ - \frac{1}{n} \log p(C) \right] = \frac{H_n}{n}, \quad a \quad (7.17) \quad (7.18)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} M \left[ - \frac{1}{n} \log p(c) \right] = H$$

Ця залежність цікава сама по собі, але вона є проявом більш загальної властивості дискретних ергодичних процесів:

- не лише  $M[f_n(C)]$  при  $n \rightarrow \infty$  має границею  $H$ , а й сама величина  $f_n(C) \rightarrow H$  при  $n \rightarrow \infty$ . Другими словами - при великих  $n$  близькість  $f_n(C)$  до  $H$  є майже достовірною подією.

Для ергодичних випадкових процесів можна сформулювати ряд наслідків:

1. Незалежно від ймовірності символів і статистичних зв'язків між ними, всі реалізації високоймовірної групи приблизно рівноймірні.

Цю фундаментальну властивість називають “властивістю асимптотичної рівнорозподіленості”. За відомої ймовірності  $P(c)$  однієї з реалізацій групи можна оцінити число  $N_1$  реалізацій в цій групі:

$$N_1 = \frac{1}{p(c)} \quad (7.19)$$

2. Ентропія  $H_n$  з високою точністю дорівнює логарифму числа реалізацій високоймовірній групі:

$$H_n = nH = \log N_1 \quad (7.20)$$

3. При великих  $n$  високоймовірна група звичайно охоплює лиш малу долю всіх  $x$  реалізацій (за винятком випадку рівноймовірних та незалежних символів, коли всі реалізації рівноймовірні і  $H = \log m$ ).

Існують об'єктивні закони змінювання ентропії в складних системах будь-якої природи, одним з яких є зростання та зменшення ентропії - зміна неупорядкованості, хаосу (стану, коли поведінка будь-якого елементу системи не залежить від поведінки решти елементів і кожного зокрема). Цей закон визначає стан організованості системи будь-якої природи, що однозначно пов'язано із ступенем відкритості системи  $\alpha$ . В повністю закритій системі ( $\alpha=0$ ) немає взаємодії з іншими системами та зовнішнім середовищем щодо обміну інформації. Це з часом обов'язково призведе до збільшення ентропії, зростання безпорядку, неорганізованості та хаосу.

Повністю відкриті системи ( $\alpha = \alpha_{\max}$ ) є лише теоретичною ідеалізацією, реальні системи мають кінцеве значення відкритості ( $0 \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$ ). Коли зростання та зменшення ентропії компенсують один одного, виникає критичний рівень організації  $E_k$ , який тим більший, чим більша степінь відкритості системи. Якщо для конкретної системи рівень організації  $E > E_k$  (це відповідає більшому значенню ентропії), то організація нижча. В процесі самоорганізації відбуваються структурні зміни в системі, збільшується організованість. Важливе місце займає самоузгодження дії елементів. Системи із самоорганізацією є предметом досліджень наукової дисципліни “синергетика”.

Реальні системи взаємодіють із зовнішнім середовищем та іншими системами, тому їх ентропія постійно змінюється (ентропійні коливання), що залежать від степені їх відкритості. Інтенсивність зовнішнього діяння на систему не повинна перевищувати деякого значення, після якого система руйнується (не встигає самоорганізовуватись достатньою мірою). Для тривалого стабільного функціонування будь-якої системи необхідно забезпечити оптимальне співвідношення таких показників: степені відкритості; початкового рівня організації  $E_0$ ; числа елементів та підсистем.

#### **7.4. Ентропійно-інформаційні співвідношення процесу управління**

Інформація та її характеристики безпосередньо впливають на впорядкованість системи, детермінованість міжелементних зв'язків структури. Виходячи з фундаментальних залежностей для ентропії, можна визначити такі закономірності:



- при взаємодії двох підсистем А і В відбувається довільне накопичення інформації (наслідок теореми К.Шеннона), а ентропія:

$$H(A;B) \leq H(A) + E(B) \quad (7.21)$$

Впорядкування структури, зменшення сумарної ентропії супроводжується збільшенням структурної інформації:

$$\Delta I_s = H(A) + H(B) - H(A;B) = \Delta H > 0 \quad (7.22)$$

-якщо підсистеми не можуть взаємодіяти між собою, впорядкування системи не відбувається, а приріст структурної інформації:

$$\Delta I_s = H(A) + H(B) - H(A;B) = 0 \quad (7.23)$$

Крім того, справедливий вираз:

$$\Delta I_s = H_{\max} - H_{\text{реальне}} = \Delta H \quad (7.24)$$

тобто, кількість інформації, яка зберігається в структурі системи є різницею між значенням максимальної ентропії при однакових і незалежних ймовірностях станів елементів, підсистем  $p_1, p_2 \dots p_n$  і її реальним значенням при неодинакових значеннях  $p_1, p_2 \dots p_n$ .

Для реалізації процесу управління складним об'єктом необхідно забезпечити такі вимоги:

1. Для зменшення ентропії об'єкта з рівня  $H_o$  до потрібного  $H_{\text{пот}}$  необхідно і достатньо, щоб кількість інформації яку отримує об'єкт, була

$$I_{\text{потр}} = H_o - H_{\text{потр}} \quad (7.25)$$

Якщо система управління буде передавати на об'єкт меншу інформацію  $I^* < I_{\text{потр}}$ , то кінцева ентропія  $H_k$  буде більшою  $H_{\text{потр}}$ , а при  $I^* > I_{\text{потр}}$  буде  $H_k < H_{\text{потр}}$  і можлива різноманітність станів об'єкта

управління знизиться, а степінь його організованості підвищиться за рахунок показника впорядкованості R.

Для ідеального управління  $x \equiv x_{\text{зд}}, H(x) \rightarrow 0$ .

Припустимо, що СУ може передавати потік інформації  $F^*(t)$  за час  $\tau_k$ . Тоді за один цикл в об'єкт вноситься кількість інформації

$$I^* = \int_0^{\tau_k} F^*(t) dt \quad (7.26)$$

і  $X \rightarrow X_{\text{зд}}$ .

Якщо діє перешкода  $f$ , то ентропія приведеної до виходу перешкоди  $-H_f(x)$

$$-H_f(x) = \int_0^{\tau_k} F_f(t) dt \quad (7.27)$$

$F_f$ -інтенсивність перешкоди

Тоді для об'єкта

$$H(x) = H_0(x) + H_f(x) - I^* \quad (7.28)$$

Якщо  $H(x) = H_{\text{потр}}$ , то

$$H_0(x) - H(x) = I_{\text{потр}} \quad (7.29)$$

Тобто:

$$I_{\text{потр}} = I^* - H_f(x), \quad (7.30)$$

$$\text{а } I^* \geq I_{\text{потр}} + H_f(x) \quad (7.31)$$

$$\text{або } \overline{F^*} \geq \overline{F_y} + \overline{F_f} \quad (7.32)$$

$\overline{F^*}, \overline{F_y}$  - середні потоки інформації управління та ентропії перешкод.

2. Якщо час управління не обмежено і  $I_{\text{потр}} < \infty$ , то для встановлення заданої впорядкованості станів об'єкта управління необхідно і достатньо, щоб

$$\overline{F}^* - \overline{F}_f \geq \varepsilon > 0 \quad (7.33)$$

Дійсно  $I_{\text{потр}}$  обмежено, тому завжди можна знайти такий час управління  $T$ , щоб

$$T_\varepsilon > I_{\text{номр}} \quad (7.34)$$

тобто можливо встановлення потрібного рівня показника впорядкованості.

Наслідки:

-якщо  $H(x)$  – диференційована функція часу, то швидкість зміни ентропії об'єкта управління дорівнює різниці потоку ентропії приведених перешкод та потоку інформації, які циркулюють в контурі управління;

-організація процесу збільшується тоді і тільки тоді, коли потік інформації, яка циркулює в системі, більший за утворений потік ентропії приведених перешкод. Тоді ентропія процесу зменшується.

3. Для того, щоб час управління  $T$  був не більший заданого, необхідно і достатньо, щоб

$$\overline{F}^* - \overline{F}_f \geq \frac{I_{\text{номр}}}{T_{\text{номр}}} = F_y \quad (7.35)$$

$T_{\text{потр}}$  - заданий час встановлення потрібної статистичної впорядкованості об'єкта управління.

4. Для того, щоб СУ забезпечувала рівень впорядкованості станів (процесів) об'єкта не нижче  $R_{\text{потр}}$ , необхідно і достатньо, щоб вона мала середню потужність не меншу, ніж

$$\overline{F} = \frac{1}{2p-1} (F_y + \overline{F_f}) \quad (7.36)$$

Ця рівність отримується з

$$\overline{F^*} > F_y + \overline{F_f} \quad (7.37)$$

Виконання умови 7.36 залежить від значення  $p$ . При  $p=0.5$  умова не може виконуватись, а при  $p<0.5$  СУ дезорганізує процес, оскільки  $I^*(X,U)<0$ .

Інформаційний підхід дає можливість оцінити властивості системи управління незалежно від її структури.

З цих позицій цікаво розглянути класичні принципи регулювання (управління):

1. За відхіленням:

ентропія регульованих змінних не може бути меншою приведеної ентропії перешкод  $H_f(x)$ .

Це базується на тому, що в системі використовується інформація лише про спостерігаємі зміни.

2. За збуренням:

ентропія управляємої системи не може бути зменшеною.

При цьому управлінні не вдається зберегти статистичну організацію системи на певному рівні. Незмінність ентропії можлива лише тоді, коли всі збурення спостерігаються, а формуємі управління настільки адекватні їм, що всі характеристики системи інваріантні відносно цих факторів- це неможливо на практиці. Не дивлячись на

чудову властивість “не пропускати” збурення, цей принцип не забезпечує потрібної впорядкованості.

### 3. Комбінований:

статистична організація процесів в об'єкті управління більш висока, чим при 1 (за відхиленням)-за рахунок введення додаткової інформації за збуренням.

Можна зменшити вимоги до об'єму інформації, але ускладнюється СУ.

Додаткові методи управління в ССУ:

-управління з прогнозом. Використання прогнозуючої інформації з урахуванням поточної та минулої (про поведінку об'єкта в різних ситуаціях) дає можливість забезпечити більш високий рівень впорядкованості при ймовірності прогнозуючої інформації  $P_{\text{пр}} > 0.5$ . Тут головна проблема – надійність прогнозу.

-управління “з пам'яттю”. Воно можливе лише за умови, що ситуація стабільна і мало змінюється за час роботи об'єкта.

При управлінні специфічною особливістю інформації є її збереженість при користуванні, що дає можливість багаторазового використання однієї і тієї ж інформації для різних цілей і дій: на відміну від речовини та енергії інформація “не розщеплюється”. При передачі джерелом  $I$  інформації множині користувачів  $n$  кожен з них приймає таку ж кількість інформації, яка видавалась джерелом. При цьому користувачі (приймачі) можуть формувати і видавати різну інформацію за змістом і кількістю  $I_1, \dots, I_n$ .

[1, с.109-123, 3, с.174-245]

### **Контрольні питання**

1. Дайте визначення інформації та її значення в складних системах управління.
2. В чому полягають інформаційні бар'єри?
3. Назвіть форми проявлення інформації.
4. Класифікація та визначення видів інформації в складних системах.
5. Вимоги до інформації.
6. Дайте визначення терміну "ентропія".
7. Властивості ентропії як міри невизначеності.
8. Як змінюється ентропія в складних системах.
9. Дайте ентропійно-інформаційні оцінки процесу управління.

### **8. Прийняття рішень в складних системах**

#### **8.1. Проблема вибору та прийняття рішень**

Вибір завжди входить одним з етапів в цілеспрямовану діяльність разом з моделюванням, передачею інформації, експериментом і т.д.

Вибір – це дія, яка надає всій діяльності цілеспрямованість і саме вибір реалізує підпорядкування всієї діяльності певній меті чи сукупності цілей.

Справа в тому, що рано чи пізно настає момент, коли подальші дії можуть бути різними, з різними результатами, а реалізувати можна лише одну дію, причому повернутись до попередньої ситуації вже (як правило) неможливо.

Зробити правильний вибір – надзвичайно важлива якість: великі полководці, видатні політики, геніальні інженери та вчені, талановиті адміністратори завжди відрізнялись вмінням приймати найкращі рішення, зробити найкращий вибір.

Особливості цього роду діяльності:

- повна формалізація, алгоритмізація вибору можлива лише для добре визначених (добре структурованих) задач;
- для погано визначених, погано структурованих задач формальних алгоритмів не існує (якщо не враховувати тривіального і далеко не завжди прийняттого алгоритму перебору, тобто методу спроб та помилок);
- на сьогодні найкращий шлях – використання можливостей людини орієнтуватись в невизначених ситуаціях та спеціальних сучасних комп'ютерних систем – діалогові системи з інтелектуальними підсистемами підтримки прийняття рішень, експертні системи, інформаційно-пошукові та інші.

Будемо представляти прийняття рішень як дії над множиною альтернатив, в результаті чого виділяється підмножина обраних альтернатив (чи одна альтернатива). Звуження множини альтернатив можливо тоді, коли є спосіб порівняння їх між собою та виділення кращих.

Для проблеми вибору характерна множинність задач. Можуть бути варіанти:

- множина альтернатив кінцева чи континуальна;
- оцінка альтернатив здійснюється за одним чи кількома критеріями (кількісними чи якісними);

- режим вибору може бути однократним (разовим) або з поверненням та навчанням на досвіді (на експерименті);
- наслідки вибору можуть бути точно відомими (вибір в умовах визначеності), мати імовірнісний характер (вибір в умовах розвитку) або мати неоднозначний результат, який не допускає введення ймовірностей (вибір в умовах невизначеності);
- відповідальність за вибір може бути одно – чи багатосторонньою: індивідуальний та груповий вибори;
- степінь узгодженості цілей при багатосторонньому виборі може змінюватись від повного узгодження (співпадіння) інтересів сторін (кооперативний вибір) до їх протилежності (вибір в конфліктній ситуації). Можливі і проміжні випадки – компромісний вибір, вибір в умовах зростаючого конфлікту і т.д.

Критеріальна мова опису вибору, найчастіше використовується, що дає можливість приписати (чи визначити) для критеріїв числа і порівнювати їх.

Якщо  $x$  – деяка альтернатива з множини  $X$ , то для  $x \in X$  можна задати функцію  $q(x)$  – критерій (якості, цільова функція, функція корисності і т.д.), яка має ту властивість, що коли альтернатива  $X_1$  краща  $X_2$  ( $X_1 > X_2$ ), то  $q(X_1) > q(X_2)$ .

Тепер, якщо вважати, що вибір будь-якої альтернативи приводить однозначно до відомих наслідків (в умовах визначеності), то найкращою альтернативою  $X^*$  є та, яка має найбільше значення критерію:

$$X^* = \arg \max_{x \in X} q(x) \quad (8.1)$$



Але задача пошуку  $X^*$  є надзвичайно складною, багато-критеріальною, залежить від характеру  $q(x)$  (функція чи функціонал), наявності екстремумів і т.д.

В складних системах управління розглядається сімейство підпроблем, розв'язання яких дає розв'язок загальної проблеми. В свою чергу кожна з підпроблем може бути достатньо складною, так, що для її розв'язання теж доцільно використати багатошаровий підхід (наприклад, функціональну ієрархію) або сформувати окрему багато-ешелонну систему (якщо дозволяють ресурси і час). Приклад – робота крупних органів планування корпорацій (рис.8.1.).

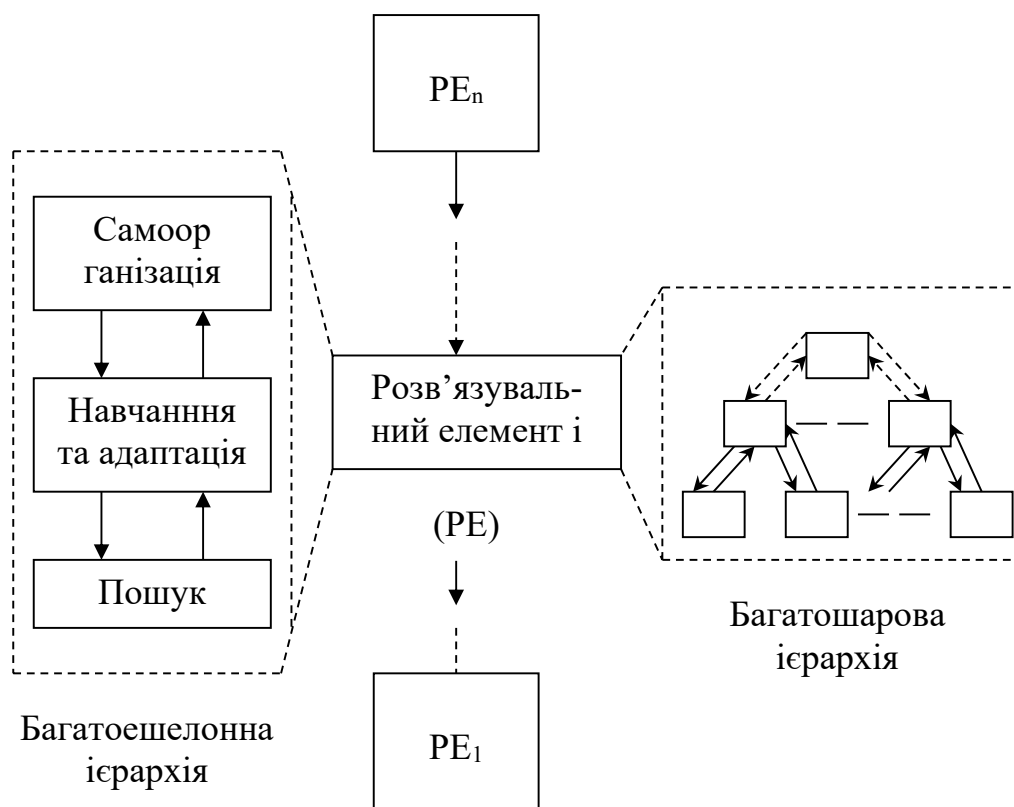


Рис. 8.1. Структура прийняття рішень

З урахуванням особливостей та закономірностей складних систем можна визначити загальні риси задач та роль підсистем в рамках ієрархічної системи:

1. Елемент верхнього рівня завжди має справу з більш крупними підсистемами або з більш широкими аспектами поведінки системи в цілому.

При багатоешелонній ієрархії елемент верхнього рівня є “командним” по відношенню до двох і більше елементів, а його рішення координує роботу цих елементів у відповідності до мети для сукупності всіх підпорядкованих йому елементів. Для концепції шарів елементи верхнього рівня відповідають за поведінку системи на протязі більш тривалих відрізків часу. Щоб отримати інформацію, потрібну для зменшення невизначеності, шар навчання повинен проводити спостереження на протязі ряду періодів прийняття рішень на першому шарі. Для зміни структури стратегії прийняття рішень третій шар (шар самоорганізації) повинен спостерігати за діями нижніх шарів на протязі ще більшого періоду час, тому що для оцінки якості стратегії навчання її необхідно випробовувати принаймні кілька разів.

Аналогічно – для концепції страт: система на будь-якому рівні утворюється з підсистем нижніх рівнів, і тоді більш висока страта має справу з більш загальним аспектом поведінки всієї системи.

2. Період прийняття рішення для елемента верхнього рівня більший, ніж для елементів нижніх рівнів. Для концепції шара та страти це очевидно, а для концепції ешелона це означає: управління від вищого елемента не можуть поступити частіше діянь, які видають нижні елементи, поведінка яких координується вищим. У

протилежному випадку не можна оцінити бажаний ефект (координації).

3. Елемент верхнього рівня має справу з більш повільними аспектами поведінки всієї системи. Це значить, що верхні рівні не можуть реагувати на такі зміни в навколишньому середовищі чи в самому процесі, які відбуваються швидше змін, з якими мають справу нижні рівні, бо останні реагують швидше, мають справу з більш частими, локальними змінами.

Наприклад, якщо на систему діють сигнали різної частоти, то всю множину  $F$  можна розбити на підмножини  $F_1, \dots, F_n$ , а на кожному шарі ( $i$ -тому) елементи реагують лише на частоту  $F_i$ .

4. Описи та проблеми на верхніх рівнях менш структуровані, мають більше невизначеностей та більш трудні (важкі) для кількісної формалізації. Сама проблема прийняття рішень на верхніх рівнях може розглядатись як більш складна. Можна застосовувати наближені методи, але тоді точність знижується і результати будуть мати низьку цінність.

Для кожного рівня є свій специфічний набір засобів для розв'язання задач, методів та алгоритмів. Наприклад на:

*шарі вибору* – управління із зворотним зв'язком, чисельні методи оптимізації;

*шарі адаптації* – статистичні методи та розпізнавання образів;

*шарі самоорганізації* – евристичні методи.

В задачах верхнього шару важко забезпечити простий чисельний розв'язок, тому тут використовується “втручання в критичних ситуаціях”, тобто оцінюють загальну характеристику та вносять

структурні зміни лише тоді, коли характеристики погіршуються настільки, що зміни стають необхідними.

Складні взаємозв'язки між рівнями викликані також обмеженою “продуктивністю” елементів, які приймають рішення. Тоді обов'язково виникає багатовишарова система, а елементи верхніх вишарів повинні витратити більше часу на пошук рішень свого рівня.

## **8.2. Моделі прийняття рішень в складних системах управління**

Проблема прийняття рішень виникає практично в усіх сферах цілеспрямованої діяльності і є принципово складною. При створенні складних систем управління виникає необхідність прийняття багатьох рішень стосовно системи в цілому, а також її підсистем та елементів. Ці рішення мають технічний, організаційний та управлінський характер. Прийняття неправильних, необґрунтованих рішень в сучасних умовах проводить до тяжких наслідків (Чорнобиль, Аральське море...)

Таким чином, проблема прийняття рішення

- центральна проблема управління об'єктами та системами будь-якої природи (складними та великими).

Проблема прийняття рішень розглядається в сучасних наукових дисциплінах:

- математичне програмування;
- теорія ігор;
- теорія статистичних рішень;
- теорія оптимального управління;
- дослідження операцій;

- системний аналіз і інш.

Для всіх цих дисциплін існує одна проблема – науковий аналіз можливих способів дії з метою визначення найкращого варіанта в даних умовах.

При прийнятті рішень завжди є такі складові:

1. Наявність мети (або кількох цілей), без якої немає проблеми;
2. Можливість альтернативних ліній поведінки. Різним альтернативам відповідають різні затрати і різні шляхи досягнення мети. Як правило, це пов'язано з невизначеностями;
3. Наявність обмежень. Ці фактори і визначають можливість вибору дій (варіантів).

Класифікація задач прийняття рішень:

- кількість цілей, критеріїв оптимальності;
- наявність залежності критеріїв і обмежень від часу;
- наявність випадкових та невизначених факторів, які впливають на результат операції (ознака “визначеність – ризик-невизначеність”)

### **Прийняття рішень в умовах визначеності і ризику**

Однокритеріальні статичні детерміновані задачі прийняття рішень (ЗПР) мають строгу математичну постановку.

Для операції, результат якої залежить від оперуючої сторони і чітко визначених факторів, записують  $n$  – вимірений вектор стратегій  $X=\{x_i\}$ ,  $i=\overline{1,n}$  та обмежень на його компоненти.

$$g_j=g_j(A_j, X)\{\leq, =, \geq, b_j, j=\overline{1,m}; m\{<, =, >\}n \quad (8.2)$$

$A_j$  – масив фіксованих не випадкових параметрів

Умови (8.2) – визначають область допустимих значень стратегій  $x$ .

Ефективність управління характеризується числовим критерієм оптимальності

$$F=F(X, C) \quad (8.3)$$

$C$ - масив фіксованих не випадкових факторів;

$A_j, C$  – приймаються відомими.

Мета оперуючої сторони

$$F=F(X, C) \rightarrow \max \quad (8.4)$$

Перед ОПР стоїть задача:

- знайти  $\hat{X}=\{X_i\}$ ,  $i=\overline{1,n}$  вектора  $X=\{X_i\}$ ,  $i=\overline{1,n}$  з області допустимих значень  $\Omega_x$ , щоб:

$$\hat{F}=F(\hat{X}, C)=\max_{x \in \Omega_x} F(X, C) \quad (8.5)$$

Така постановка ЗПР співпадає із загальною постановкою задачі математичного програмування (МП):

$$\begin{cases} F(X) \rightarrow \max \\ g_j(X) \{ \leq, =, \geq \} b_j, j = \overline{1, m} \end{cases} \quad (8.6)$$

$X=\{X_i\}$ ,  $i=\overline{1, n}$  –  $n$  – вимірний вектор змінних задачі.

Для розв'язання задач МП не існує єдиного метода. В залежності від виду функцій  $F(X)$  і  $g_j(x)$  застосовуються спеціальні методи, в першу чергу це залежить від диференційованості функцій  $F(X)$  та обмежень  $g_j(x)$  (диференційовності).

В умовах ризику враховуються деякі осереднені характеристики випадкових факторів, тому сам по собі ризик завжди присутній. Наприклад: виконання плану підприємством при випадковому постачанні комплектуючих елементів і сировини. Використовується

табличний метод: в таблиці записуються значення показників ефективності, стратегії та результати з можливими ймовірностями.

Оптимізація рішення в умовах ризику часто використовує зведення стохастичної ЗПР до детермінованої та оптимізації в середньому.

### Багатокритеріальні ЗПР

В загальному випадку стратегія оперуючої сторони  $X_i$ ,  $i=1,n$  може бути скаляром, вектором, матрицею або ще більш складним утворенням.

Прийmemo:  $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$  –  $n$  – вимірний вектор. Компоненти  $X_i$  зв'язані з конкретними фізичними та економічними показниками задачі, тобто обмежені:

$$G_j = G_j(C_j, X) \geq b_j, j=\overline{1, m} \quad (8.7)$$

$G_j$  – векторна функція;  $b_j$  – фіксована скалярна величина;  $C_j$  – деяка сукупність фіксованих величин (скаляр, вектор...). Ці умови визначають область допустимих стратегій  $\Omega_x$ , тобто з цієї області ОПР обирає стратегію в даній ситуації.

Ефективність дій оперуючої сторони оцінюється сукупність локальних критеріїв  $E_1, E_2, \dots, E_k$ , які мають коефіцієнти відносної важливості  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ . Тоді є два вектори:  $\Lambda=(\lambda_e)$ ,  $e=1, k$  і  $E=(E_e)$ ,  $e=1, k$ . Кожний критерій характеризує локальну мету операції і зв'язаний із стратегією відображенням.

$$E_e = E_e(A_e, X), e=1, k \quad (8.8)$$

$A_e$  – сукупність фіксованих факторів.

Частинним випадком відображення  $X \rightarrow E_e$  є функціональна залежність між критерієм  $E_e$  і стратегією  $X_j$ .

Одночасне досягнення мети операції за всіма локальними критеріями при одній стратегії неможливо, тому рішення полягає в знаходженні компроміса в досягненні локальних цілей. Тоді виникає задача:

- стратегія  $X_{opt}$  повинна належати множині  $\Omega_x$  її допустимих значень;
- стратегія повинна бути найкращою стосовно прийнятого принципу компроміса з урахуванням вектора  $\Lambda$  важливості критеріїв

$$E_{opt} = E(X_{opt}) = \underset{x \in \Omega_x}{\text{opt}} [E(x), \Lambda] \quad (8.9)$$

Оператор  $\text{opt}$  визначає принцип оптимальності, вибір найкращого рішення. Принцип оптимальності – математична модель принципу компроміса.

Область  $\Omega_x$  можна розділити:

- $\Omega_x^c$  – область згоди, коли рішення може бути покращено одночасно за всіма показниками (або принаймі без зниження рівня будь-якого з критеріїв);
- $\Omega_x^k$  – область компромісів, в якій покращення якості рішення за одними локальними критеріями приводить до погіршення якості рішення по іншим.

Оптимальне рішення належить області компромісів  $\Omega_x^k$ .

Для вибору варіанта рішення необхідно розкрити оператор  $\text{opt}$ , тобто знайти схему компроміса, що здійснює ОПР суб'єктивно.

При аналізі схеми компромісу приймається, що локальні критерії нормалізовані (мають однакову розмірність або є безрозмірними) та мають однакову важливість.



Використовуючи область допустимих критеріїв, можна записати:

$$E_{\text{opt}} = E(X_{\text{opt}}) = \text{opt}[E(X), \wedge] = \text{opt}[E, \wedge] \quad \begin{matrix} x \in \Omega_x & E \in \Omega_E^k \end{matrix} \quad (8.10)$$

Схеми компромісу: (принципи) рівномірність; справедливої поступки; виділення одного оптимізуемого критерія; послідовних поступок і інш.

1. Для забезпечення одночасно екстремума функцій  $f_1(x)$ ,  $f_2(x) \dots f_n(x)$  використовується лінійна згортка:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n C_i f_i(x) \quad (8.11)$$

$C_i$  – додатні числа, нормовані наприклад так:  $\sum_{i=1}^n C_i = 1$ .

При такому способі згортки вводиться відношення еквівалентності різних критеріїв, а величини  $C_i$  показують, наскільки змінюється функція  $F(x)$  при зміні критерія  $f_i(x)$  на одиницю:  $C_i = \frac{\partial F}{\partial f_i}$ .

Значення  $C_i$  – результат експертизи, вони дають уявлення оперуючої сторони про зміст компромісу (вимушеного). Зміст компроміса – ранжування цілей, яке разом з призначенням вагових коефіцієнтів є додатковою гіпотезою для зведення багатокритеріальної задачі до однокритеріальної.

2. Використання контрольних показників. Часто в задачах планування та конструювання задається система нормативів:  $f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*$ . Тоді необхідно максимізувати функції  $f_i(x)$  за умов  $f_i(x) \geq f_i^*$ ,  $i=1, n$ .

Цільову функцію подають у виді

$$F(x) = \min_i \frac{f_i(x)}{f_i^*} \quad (8.12)$$

і шукають вектор  $x$ , який забезпечує максимальне значення  $F(x)$ .

Наприклад:

$$\begin{array}{l|l} f_1(x)=2x & f_1^*(x)=4 \\ f_2(x)=x^2 & f_2^*(x)=2 \\ f_3(x)=6x & f_3^*(x)=8 \end{array}$$

$$1. x=1 \quad \frac{f_1(x)}{f_1^*} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2} = 0,5; \quad \frac{f_2(x)}{f_2^*} = \frac{1}{2} = 0,5; \quad \frac{f_3(x)}{f_3^*} = \frac{6}{8} = 0,75$$

$$2. x=2 \quad \frac{f_1(x)}{f_1^*} = \frac{4}{4} = 1; \quad \frac{f_2(x)}{f_2^*} = \frac{4}{2} = 2; \quad \frac{f_3(x)}{f_3^*} = \frac{12}{8} = \frac{6}{4} = \frac{3}{2} = 1,5$$

В чому смисл? При даному значенні вектора  $X$  величина  $F(x)$  дає значення найгіршого показника  $f_i(x)$ . Значить умова  $F(x) \rightarrow \max$  означає вибір таких конструктивних параметрів  $x$ , які максимізують відношення  $i$ -го реально досягнутого значення критерія до його контрольного значення. Якщо значення  $f_i^*$  жорстко не задаються, то вони можуть визначатись в результаті експертного опитування.

3. Виділення одного критерія. Якщо є контрольні показники  $f_i^*$  відносно яких критерії  $f_i(x)$  повинні задовольняти умовам:

$$f_i(x) \geq f_i^*, \quad i=\overline{1,n},$$

то серед них можна визначити основний

$$f_1(x) \rightarrow \max$$

4. Введення метрики в просторі цільових функцій. Гіпотеза: допустимо, що розв'язана система однокритеріальних задач:

$$f_i(x) \rightarrow \max; \quad i=\overline{1,n},$$

а в  $i$ -й задачі знайдемо вектор  $x=x_i$ , який доставляє  $\max$  критерію  $f_i(x)$ :

$$f_i(x_i) = \hat{f}_i, \quad i=\overline{1,n}$$

Сукупність скалярних величин  $\hat{f}_i$  визначає в просторі критеріїв деяку точку – точку “абсолютного максимуму”. Якщо вектори  $x_i$  різні, що не існує вибора такої точки: точка  $(\hat{f}_1, \hat{f}_2, \dots, \hat{f}_n)$  є недосяжною в просторі критеріїв. Вводиться додатньо визначена матриця  $R=(r_{ij})$ . Тоді скалярна величина:

$$h = \sqrt{\sum_{i,j} (f_i(x) - \hat{f}_i) r_{ij} (f_j(x) - \hat{f}_j)} \quad (8.13)$$

визначає в просторі критеріїв деяку відстань від точки, яка відповідає даному вектору  $x$ , до точки “абсолютного максимуму”. В частинному випадку, коли  $R$  – одинична матриця

$$h = \sqrt{\sum_i (f_i(x) - \hat{f}_i)^2} \quad (8.14)$$

- евклідова відстань від точки  $(f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n))$  до точки  $(\hat{f}_1, \hat{f}_2, \dots, \hat{f}_n)$  в просторі критеріїв.

В цьому випадку мінімізація  $h$  як нового критерія дає корисну інформацію – показує граничні можливості досягнення “абсолютного максимуму”.

## 5. Компроміси Парето

Смисл згортки критеріїв – одна задача замінюється іншою, але можна підійти до аналізу багатокритеріальних задач з інших позицій: спробувати скоротити множину початкових варіантів, тобто виключити з аналізу ті варіанти рішень, які будуть наперед незадовільними. Один з шляхів – економіст В.Парето (1904, Італія).

Допустимо, що зроблено вибір  $x^*$  і існує ще вибір  $\hat{x}$  такий, що для всіх критеріїв  $f_i(x)$  мають місце нерівності:

$$f_i(\hat{x}) \geq f_i(x^*), \quad i=1, n,$$

причому хоча б одна нерівність – строга. Тоді зрозуміло, що вибір  $\hat{x}$  кращий  $x_1^*$  і можна одразу всі вектори  $x^*$ , які задовольняють умові, виключити з розгляду. Має сенс співставляти і аналізувати лише ті вектори  $x^*$ , для яких не існує  $\hat{x}$  такого, щоб для всіх критеріїв виконувалась умова. Множину значень  $x^*$  називають множиною Парето, а вектор  $x^*$  - не покращуємий вектор результатів (вектор Парето), якщо з  $f_i(\hat{x}_i) \geq f_i(x^*)$  для будь-якого  $i$  випливає  $f_i(\hat{x}) = f_i(x^*)$ .

Допустимо, що цілі об'єкта визначаються двома однозначними функціями

$f_1(x) \rightarrow \max, f_2(x) \rightarrow \max$  (рис.8.2)

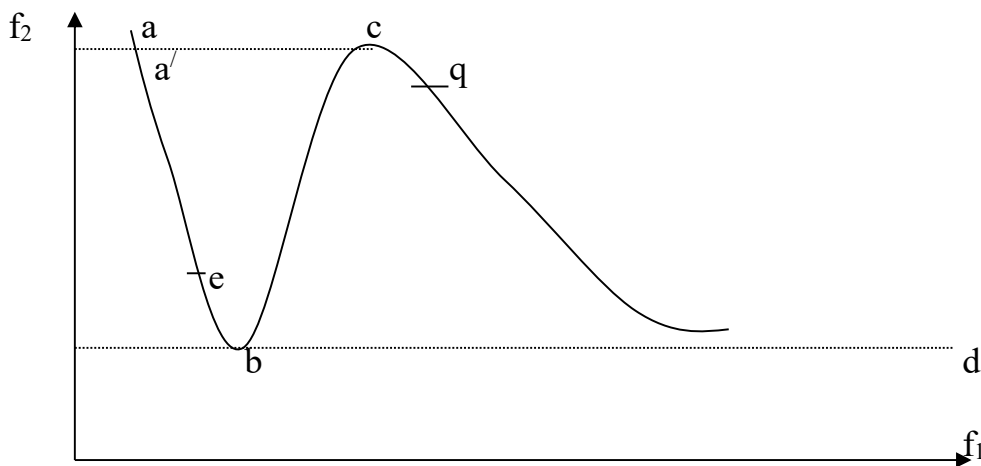


Рис.8.2. Площина критеріїв

Тоді кожному допустимому значенню змінної  $x$  відповідає одна точка на площині,  $(f_1, f_2)$ , а рівності  $f_1 = f_1(x), f_2 = f_2(x)$  визначають параметричне завдання деякої кривої  $abcd$  на цій площині.

Але до множини Парето можна віднести далеко не всю криву: так ділянка  $bc$ , очевидно, не належить до множини Парето, бо з ростом  $f_1$  відбувається зростання і  $f_2$ . Це значить, що на цій ділянці зміні  $x$

відповідає одночасне зростання обох цільових функцій, і ці варіанти треба виключити з розгляду.

Так само виключається ділянка  $a'b$ , бо для кожної її точки  $e$  можна знайти на  $cd$  точку, в якій значення обох функцій  $f_1$  і  $f_2$  більші, чим в точці  $e$ . Таким чином, на належність до множини Парето можуть претендувати лише ділянки  $aa'$  і  $cd$ , причому точка  $a'$  повинна виключатись.

Принцип Парето не виділяє єдиного рішення, він лише звужує кількість альтернатив.

#### Прийняття рішень в умовах невизначеності.

Задача прийняття рішень (ЗПР) в умовах невизначеності – вибір оптимальної стратегії в операції, результат якої крім стратегій оперуючої сторони і ряду фіксованих факторів (детермінованих, стохастичних або і тих, і інших) залежить від невизначених факторів, невідомих в момент прийняття рішень, не залежних від оперуючої сторони. Тому кожній стратегії оперуючої сторони відповідає не єдиний (як в детермінованому випадку), а множина можливих результатів.

Необхідно розрізняти стохастичні і невизначені фактори. Щодо стохастичних факторів, то для них існує достатньо повна стохастична інформація, а невизначені фактори проявляються внаслідок недостатньої інформації щодо “природи” операції: невідомі характеристики процесів та властивості об’єктів, зовнішні умови.

Можна виділити дві групи факторів, які викликають невизначеності нестохастичної природи:

- стратегічні невизначеності, коли в операції приймають участь кілька оперуючих сторін, які мають різні цілі, і кожна сторона приймає рішення в умовах, коли дії інших учасників невідомі;

- концептуальні невизначеності – невизначені фактори для особливо складних рішень з довгостроковими наслідками, нечіткими уявленнями про власні цілі інших учасників. Тут часто виникає конфліктна ситуація, для аналізу якої і прийняття рішення в умовах активної дії кількох учасників використовуються теорія ігор та мінімакса (максиміна).

З конфліктними ЗПР пов'язані передумови:

- кожному учаснику відомі цілі і стратегії інших;
- кожен учасник є розумним та активним, тому визначальними в його поведінці вважається прагнення максимального досягнення власних цілей.

Це спрощує підхід до прийняття рішень, на цьому засновані теорія ігор і теорія мінімакса. З урахуванням “природи” ситуації ЗПР ускладнюється: їй не можна приписати свідомо поставлених цілей, але людина поступово вивчає закони природи і знижує, зменшує невизначеності.

В ЗПР в термінах “гра з природою” процедури формалізуються так:

- ОПР може обрати один з  $n$  можливих варіантів рішень  $x_i, i=1, n$ ;
- результат операції:  $s_j, j=1, m$  приймають:  $A$  – виграш ОПР,  $\bar{A}$  – втрати.

Тоді в табличному вигляді або матриці втрат (виграшів) задається:

$$A=[a_{ij}], \quad \bar{A}=[\bar{a}_{ij}], \quad (8.15)$$

$a_{ij}=A(x_i, s_j)$  – виграш для рішення  $x_i$  при  $s_j$ .

Функцію втрат необхідно перетворити в функцію ризиків, яка визначає можливі втрати ОПР в залежності від одного аргумента – приймаємого рішення  $x_i, i=\overline{1,n}$ ;

Якщо зафіксувати деяку стратегію (рішення)  $X' \in X$ , то з двох-аргументної функції  $A(x_i, s_j)$  отримують нову, одноаргументну функцію, яка відображає залежність втрат від результату операції при фіксованому рішенні  $X'$  - функція  $A'(x', \overline{s_j})$ . Функція втрат перетворюється в функцію ризика за допомогою функціонала  $P$ . Результат:       

$r(x') = PA'(x', s_j)$  – число, ризик, пов'язаний з стратегією  $x'$ .

Тоді: найкращою є стратегія (якщо вона існує)  $X^* \in X$ , яка мінімізує ризик на множині  $X$ :

$$r(x^*) = \min_{x_i \in X} r(x_i), \quad i=\overline{1,n} \quad (8.16)$$

Критерії оптимальності вибору рішень ОПР за умови відсутності апіорної інформації щодо результатів операції  $s_j$ .

Критерій Лапласа. Приймається, що ймовірності результатів  $s_j$  рівні. Тоді для кожного рядка матриці виграшів  $A=[a_{ij}]$  підраховується середнє значення оцінок, а оптимальна стратегія – максимальне значення цього середнього:

$$F_{opt} = F(X_{opt}, S) = \max_{1 \leq i \leq n} \left[ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m a_{ij} \right] \quad (8.17)$$

Критерій Вальда. Оптимальною вважається стратегія, коли мінімальний виграш є максимальним, тобто гарантується виграш, не менший, ніж максимін:

$$F_{opt} = F(X_{opt}, S) = \max_{1 \leq i \leq n} \min_{1 \leq j \leq m} a_{ij}$$

Цей критерій орієнтує ОПР на найгірші умови та рекомендує обирати стратегію, для якої в гірших умовах виграш максимальний (принцип – “завжди необхідно розраховувати на гірше”). Це – критерій крайнього песимізму.

Критерій Севіджа. Можна в кожному стовбці матриці виграшів  $A = |a_{ij}|$  обрати  $\max a_{ij}$  і скласти нову матрицю:

$$r_{ij} = \max_{1 \leq i \leq n} a_{ij} - a_{ij} \quad (8.18)$$

Матриця ризиків  $R = |r_{ij}|$  дає можливість обрати стратегію, за якою величина ризику приймає найменше значення в самій несприятливій ситуації:

$$\begin{aligned} F_{opt} = F(X_{opt}, S) &= \min_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} r_{ij} = \\ &= \min_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} (\max_{1 \leq i \leq n} a_{ij} - a_{ij}) \end{aligned} \quad (8.19)$$

Сутність критерія – за будь-яких умов уникнути великого ризику при прийнятті рішень. Це теж критерій крайнього песимізму, але гіршим тут є не мінімальний виграш, а максимальний ризик – максимальна втрата виграшу в порівнянні з тим, що можна було досягнути за даних умов.

Критерій Гурвиця. Між крайнім песимізмом (розрахунок на гірше) та легковажним оптимізмом (розрахунок на краще) при виборі стратегії в



умовах невизначеності критерій Гурвиця рекомендує розраховувати на деякий середній результат:

$$F_{opt} = F(X_{opt}, S) = \max[\alpha \max a_{ij} + (1 - \alpha) \min a_{ij}] \quad (8.20)$$

$$1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m, \quad 1 \leq j \leq m$$

$\alpha$  - коефіцієнт оптимізму,  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

При  $\alpha=1$  критерій Гурвиця перетворюється в критерій крайнього песимізму Вальда,

при  $\alpha=0$  – критерій крайнього оптимізму, коли рекомендується обирати стратегію, за якої в найкращих умовах виграш максимальний;

при  $0 < \alpha < 1$  – середня оцінка між крайнім песимізмом та крайнім оптимізмом,  $\alpha$  - міра песимізму ОПР. Чим більш небезпечна ситуація, тим більше намагаються “підстрахуватись”,  $\alpha \rightarrow 1$ .

Критерій Байєса. В цьому випадку на множині всіх ситуацій вважається відомим апріорне розподілення ймовірностей  $P(s_j)$ .

Цей критерій мінімізує середні втрати, тобто ризик тут – математичне сподівання:

$$r(x_i) = \sum_{j=1}^m \bar{a}_{ij} P(s_j) \quad (8.21)$$

Найкраща стратегія мінімізує ризик:

$$r(x^*) = \min \sum_{j=1}^m \bar{a}_{ij} P(s_j) \quad (8.22)$$

$$1 \leq i \leq n$$

### 8.3. Системи підтримки прийняття рішень (СППР)

В літературі є кілька визначень:

1.СППР – людино-машинні об'єкти, які дозволяють особам, які приймають рішення (ОПР), використовувати дані, знання, об'єктивні та суб'єктивні моделі для аналізу і розв'язання слабкоструктурованих проблем.

Слабкоструктуровані задачі – включають як кількісні, так і якісні змінні, причому домінують якісні аспекти.

Неструктуровані проблеми мають лише якісний опис.

2. СППР – комп'ютерна система, яка дозволяє ОПР поєднувати власні суб'єктивні переваги з комп'ютерним аналізом ситуації при виробленні рекомендацій в процесі прийняття рішень.

Головне тут – поєднання суб'єктивних переваг з комп'ютерними методами.

3. СППР – комп'ютерна інформаційна система, яка використовується для різних видів діяльності при прийнятті рішень в ситуаціях, коли неможливо чи небажано мати автоматичну систему, яка повністю виконує весь процес рішення.

Робота колективів, технічних систем управління базується завжди на обміні, обробці інформації та прийнятті рішень, які засновані на аналізі цієї інформації. Для складних систем зростає об'єм інформації, підвищуються вимоги до надійності і оперативності обробки інформації та прийняття рішень.

Розподілені системи підтримки прийняття рішень виконують функції:

- генерують варіанти рішень;
- виконують оцінку та моделюють можливі наслідки рішень, дають можливість обрати кращий варіант з існуючих не на основі досвіду та інтуїції, а на основі формалізованих оцінок та прогнозу результатів;

- дозволяють узгодити групові рішення.

Головне: системи підтримки прийняття рішень допомагають спеціалісту, який приймає рішення, більш чітко сформулювати, дослідити та прийняти обгрунтовану дію (рішення), яке базується на більш глибокому розумінні ситуації.

Конкретна система може виконувати не всі, а частину названих функцій.

Розподілені системи підтримки прийняття рішень складаються з експертних систем, розташованих в зв'язаних між собою вузлах обчислювальної мережі, кожен з яких може незалежно розв'язувати свої частинні задачі, але для розв'язання загальної проблеми ні один з них не має достатніх знань, інформації та ресурсів (чи деяких з них), тобто загальну задачу вони розв'язують лише спільно, об'єднуючи свої локальні можливості та узгоджуючи частинні рішення.

Доцільність застосування розподілених систем:

1. Складні задачі розв'язуються з використанням методів декомпозиції, не дивлячись на величезні можливості обчислювальної техніки.

2. Сучасні комп'ютерні технології орієнтуються на використання мережових структур, де задачі розв'язуються не централізовано, а розподілено.

3. Технологічні та виробничі процеси є розподіленими (функціонально, територіально, функціонально та територіально) тому й системи управління відповідно розподілені також.

4. Розподілені в просторі системи полегшують обмін інформацією та прийняття узгоджених рішень групами спеціалістів.

5. Принцип модульної побудови найкраще реалізується саме в розподілених системах підтримки прийняття рішень.

Таким чином розподілені системи підтримки прийняття рішень (РСППР) дозволяють здійснювати:

- постійний обмін інформацією про ситуацію та можливих рішеннях;
- знаходити локальні оптимальні рішення, отримані шляхом перебору можливих варіантів;
- моделювати наслідки рішень для оцінки їх правильності та ефективності;
- узгоджувати групові рішення.

#### Варіанти СППР:

1. Рішення приймається в автоматичному режимі в одному вузлі (ЕОМ, система автоматичного чи ручного введення (інформації, засоби візуалізації). Експертна система визначає ситуацію (ідентифікує), приймає та/чи реалізує управління.
2. Рішення приймає спеціаліст, в розпорядженні якого є СППР, а експертні системи пропонують варіанти.
3. Рішення пропонуються різними експертними системами, які є в одному вузлі, але оцінюють ситуацію з різних “точок зору”. Вони можуть запропонувати різні рішення, які корегуються спеціалістам.
4. Рішення пропонуються різними експертними системами, які знаходяться в різних вузлах мережі, але й спеціалісти можуть знаходитись в різних вузлах.

В різних вузлах можуть прийматись різні рішення.

5. Рішення пропонують різні спеціалісти на різних вузлах мережі, і ці рішення необхідно узгоджувати.

6. Можливий варіант, коли різні рішення пропонуються і експертними системами, і спеціалістом - експертом

Варіанти 3-6 – відносяться до розподілених СППР.

Експертні системи – клас інтелектуальних інформаційно-вимірjuвальних та управлінських систем. Інтелектуальні системи завжди оперують знаннями, тобто замість традиційних технологій накопичення та обробки даних тут використовується технологія накопичення та обробки знань.

Експертні системи (ЕС) відносяться до інтелектуальних комп'ютерних систем і призначені для моделювання (імітації) поведінки досвідчених спеціалістів-експертів при розв'язанні задач з певної предметної області.

Є різні визначення експертних систем, наприклад Комітет British Computer Societu:

“ЕС - втілені в ЕОМ компоненти досвіду експерта, засновані на знаннях, в такій формі, що комп'ютер може дати інтелектуальну пораду чи прийняти інтелектуальне рішення відносно розв'язуваної функції. Бажано також, щоб була додаткова властивість (часом саме її вважають головною) – спроможність системи за вимогою пояснити хід своїх міркувань зрозумілим для користувача способом. Все це забезпе-чується в результаті програмування, заснованого на формальних правилах.”



Рис.8.3. Компоненти експертної системи

#### Риси експертних систем

1. ЕС обмежена певною сферою експертизи.
2. Вона здатна міркувати при сумнівних даних.
3. ЕС здатна пояснити ланцюжок міркувань зрозумілим способом.
4. Факти і механізми висновків чітко відділені один від одного.
5. ЕС будується так, щоб була можливість поступового нарощування її можливостей (функцій).
6. ЕС заснована на використанні правил.
7. На виході ЕС видає пораду - не таблицю з цифр, не картинку на екрані - а чітку відповідь.
8. ЕС економно вигідна (вимога до її роботи!).

Основні особливості експертних систем (ЕС). При створенні та розвитку ЕС роль програміста змінюється: від розробки детальних процедур до складання переліка – вимог до системи.

Створення, обробка та зберігання масивів знань – виключно трудомісткий процес, для реалізації якого потрібні значний об'єм пам'яті та швидкодія.

Для ЕС характерно:

- наявність евристичних засобів для формування та перевірки гіпотез і закономірностей;
- використання для спілкування природньої мови;
- можливість аналізувати значні масиви інформації для пошуку елементів, які відповідають певним вхідним сигналам;
- в основі функціонування повинен лежати формальний математичний апарат – різновидність апарату дедуктивних систем (дедуктивна система засновується на базі аксіом та правил висновків, а механізм її функціонування - генерація висновків в алфавіті обраного обчислення);

Основна термінологія ЕС:

- аксіоми та результати обробки дедуктивної системи - факти, які складають вміст бази даних;
- продукційні правила, отримувані від експертів – зміст бази знань;
- спеціалісти по наданню даних та знань – інженери по знанням;
- побудова доведень – міркування;
- обґрунтування шляхів досягнення рішень – пояснення;





В базі знань інформація за допомогою спеціальних засобів класифікується, узагальнюється, оцінюється її непротиворічність, об'єднуються інформаційні одиниці. В результаті – виникає структурована модель проблемної області, в якій відображені особливості, закономірності та способи рішення задач. Цим всім керує блок підтримки бази знань.

Блок пояснення – один з основних, що виділяє ЕС в окремий клас. Користувач може звертатись до цього блоку із запитанням:

- “що таке X?”. Тоді ЕС після пошуку в базі знань видає всю наявну інформацію про X. Часто необхідно отримати логічним шляхом на основі зберігаємих фактів нові факти;

- “як отримано Y?”. Користувач бажає ознайомитись з міркуваннями системи при отриманні фактів чи висновків;

- “чому отримано Y, а не Z?” – пояснення альтернатив;

- “навіщо потрібен X?”. Обґрунтування беруться з моделі проблемної області, яка зберігається в базі знань.

Це фактично розподілення праці між користувачем, системним аналітиком, системним та прикладним програмістом і ЕОМ в процесі постановки та розв'язання на ній різних задач.

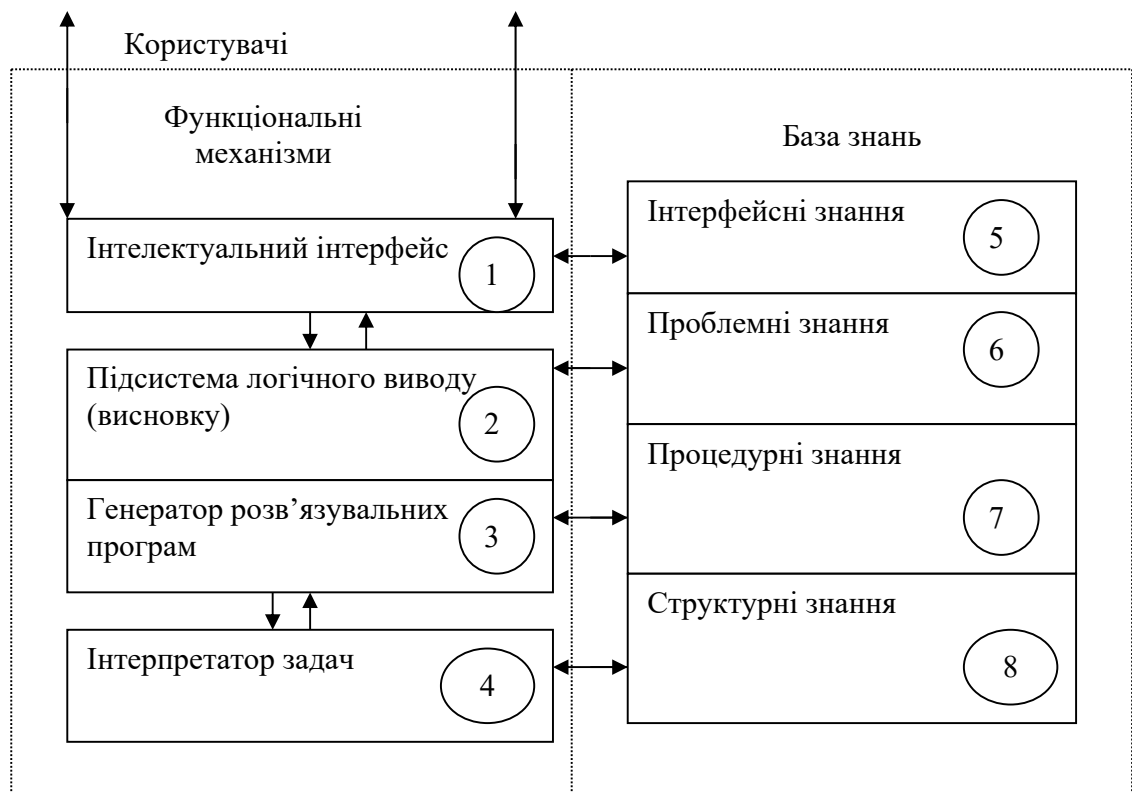


Рис.8.5. Функціональна модель інтелектуальної системи

1.(/ /) – для спілкування системи із зовнішнім середовищем (користувачем) шляхом перетворення текстової, графічної, образної чи мовної інформації у внутрішню форму подання і навпаки. / / синтезує програму для ЕОМ і має два блоки: процесор спілкування і планувач (планировщик).

2.Здійснює постановку задачі та прийняття рішень на основі аналізу тематики вхідного повідомлення та наявних знань. Логічний висновок використовує правила дедукції і факти з бази знань.

3. Формує програму розв'язання задачі з використанням знань про методи її рішення.

4. Виконує запрограмовану обробку інформації

Інтелектуальні можливості системи визначаються базою знань, яка містить:

5. – інформація про принципи взаємодії із зовнішнім середовищем (мови спілкування, способи комунікації, форми подання інформації;

6. – формалізована інформація про навколишній світ (сміслові питання, відношення, зразки поведінки, способи формування нових понять);

7.- відображають евристичний аспект розвитку досвіду системи в розв'язанні задач, включають базу алгоритмів у вигляді процедурно заданих моделей типових рішень, методів доведень, стандартних форм перетворень і інш.

8.- відображають технологічний аспект розвитку системи і містять інформацію про саме операційне середовище – ресурси, способи доступу, принципи взаємодії, алгоритми управління, контролю та відновлення. Наявність структурних знань забезпечують гнучкість і адаптивність системи.

Різноманітність інтелектуальних систем – ЕОМ (сьогодні і наступних поколінь), які повинні:

- сприймати усну мову;
- “розуміти” графічний текст, рисунки;
- друкувати з голоса;
- сортувати данні і вибирати з них необхідні для конкретної задачі;
- адаптувати і вдосконалювати власний досвід, програмне забезпечення;

- обирати алгоритми розв'язання і синтезувати необхідні програми за умовами задачі.

### Побудова бази знань

База знань (БЗ) спочатку пуста, і інженер по знанням вияснює шляхом опитування спеціалістів – експертів формулювання закономірностей (продукційних правил) та фактів, характерних для досліджуваної предметної області. Це інтерактивний процес і здійснюється він шляхом спроб та помилок. БЗ створюється накопиченням фактологічної інформації, тестуванням створеної ЕС та додаванням нових знань по необхідності.

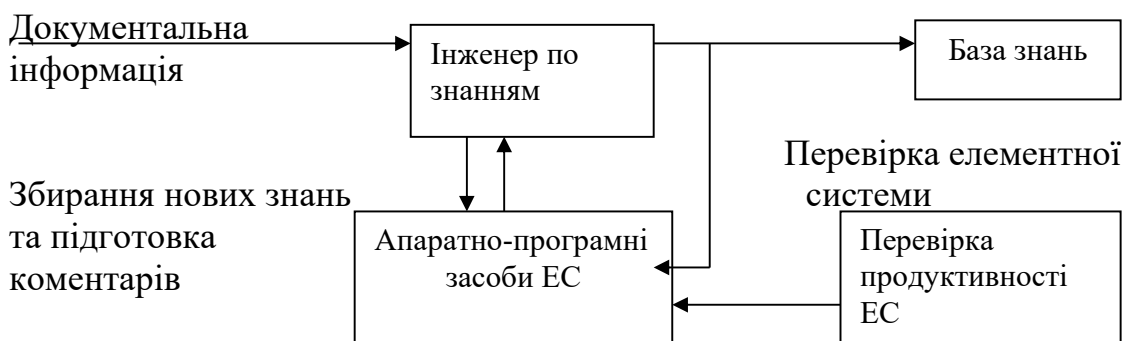


Рис.8.6. Схема побудови бази знань

Інженер по знанням повинен вміти:

- отримувати потрібні знання, формувати модель предметної області та підтримувати її при функціонуванні ЕС;
- знаходити в спеціальній літературі необхідні знання;
- обробляти думки експертів, знаходити узгоджені формування, представляти їх в логічному зв'язку і послідовності;
- обирати методи формалізації знань;

- організовувати в БЗ необхідні моделі та підтримувати в робочому стані.

При побудові ЕС формулюється множина правил, які можуть бути неповними чи протирічними, а точно передбачити поведінку системи неможливо, тобто використовуються прийоми евристичного програмування.

ЕС за призначенням:

- консультаційні (інформаційні);
- дослідницькі;
- управляючі.

За складністю та об'ємом БЗ:

- неглибокі;
- глибокі.

Неглибокі ЕС створюються за короткий час (2-3 місяці) і мають відносно малі БЗ і БД (кілька сотень правил і фактів, причому фактів значно більше). Більшість висновків (заключень) є прямими наслідками інформації з БЗ. Тут, в основному емпіричні знання, не зв'язані з моделями процесів та явищ. Ці ЕС призначені для розв'язання простих задач типу відповіді на запити (технічна інформація).

Глибокі ЕС формують висновки з моделей процесів, які є в БЗ, а модель – набір правил, призначених для пояснення великої кількості даних. Часто знання, отримані з глибоких ЕС, вражають своєю неочевидністю.

ЕС не обов'язково повинна бути глибокою. Наприклад, консультативна медичинська ЕС співставляє за допомогою правил симптоми хвороби з накопиченими в БЗ. Це неглибокі ЕС, але вони

працюють швидко, більш точно, ніж люди, і мають переваги у виборі альтернатив.

Відомі ЕС в комп'ютерних фірмах, наприклад IBM: ЕС для консультацій з випробувань та ремонту накопичувачів інформації.

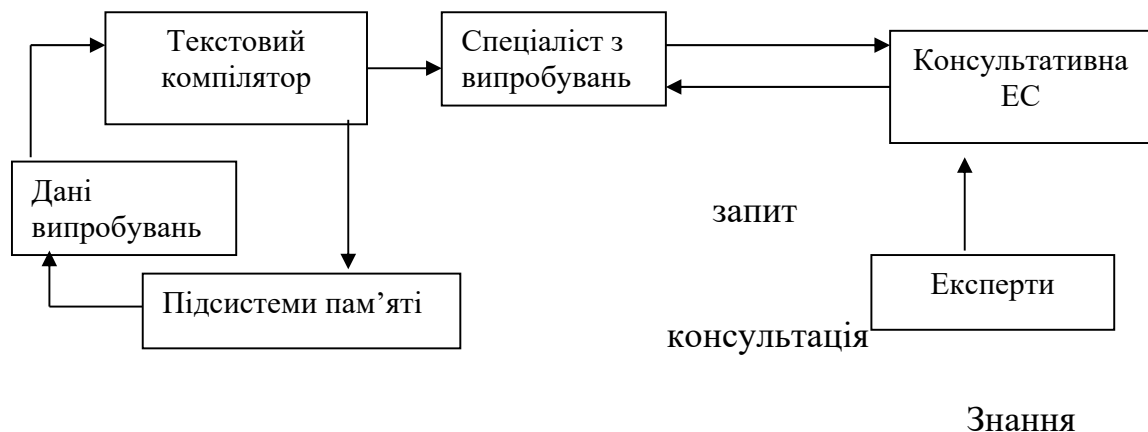


Рис.8.6. Структура ЕС

Представлення знань в ЕС. При розробці ЕС виконуються етапи:

- ідентифікація (вибір мети, задач, ресурсів, ключових понять);
- концептуалізація (аналіз проблемної області, типів даних, зв'язки між ними, методи розв'язання задач);
- формалізація (способи представлення знань, формалізація понять, методів розв'язання, моделювання роботи системи, оцінка адекватності понять меті, способи маніпулювання даними).
- наповнення бази знань;
- тестування ЕС, перевірка її компетентності;
- дослідна експлуатація.

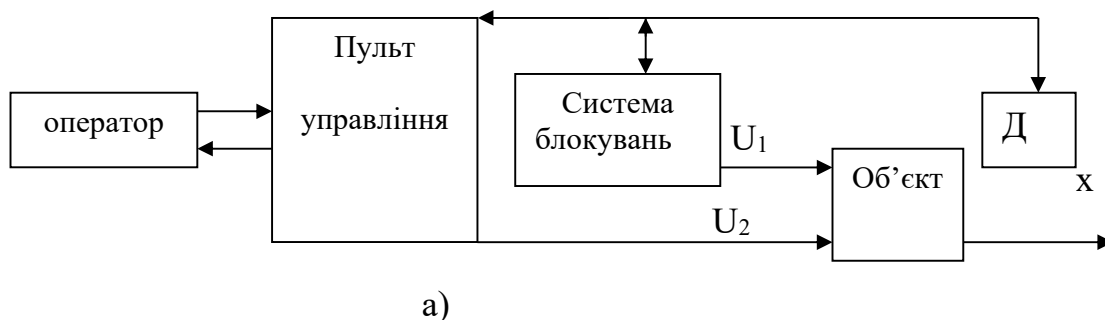
Способи подання знань:

- логічні моделі;
- мережові моделі;
- продукційні моделі;
- фреймові.

Для ЕС управління ТП найбільш зручними є фреймові, які використовують каузальні (причинні) сценарії. Це ієрархічна структура знань, наочний опис об'єкта, доступність, можливість використання взаємозв'язків між характерними об'єктами предметної області.

Фрейм – фрагмент знань, який асоціюється із стереотипними ситуаціями і має вигляд структурованих наборів даних. Кожний набір даних - “слот”, який може вказувати на інший фрейм, тобто встановлювати між ними зв'язки. В фреймі можуть бути очікувані параметри ситуації. Ідея фрейма схожа з ідеєю запису при обробці даних: всі атрибути об'єкта зібрані разом в єдиній комбінаційній структурі. Таким чином, фрейм – засіб організації знань.

Для ЕС, які використовуються при управлінні технологічними об'єктами, використовують каузальні сценарії у вигляді фреймо-подібних списочних структур. Сценарій – основна структурна одиниця бази знань, це формалізований опис стандартної послідовності взаємозв'язаних фактів, які визначають типову ситуацію предметної області.



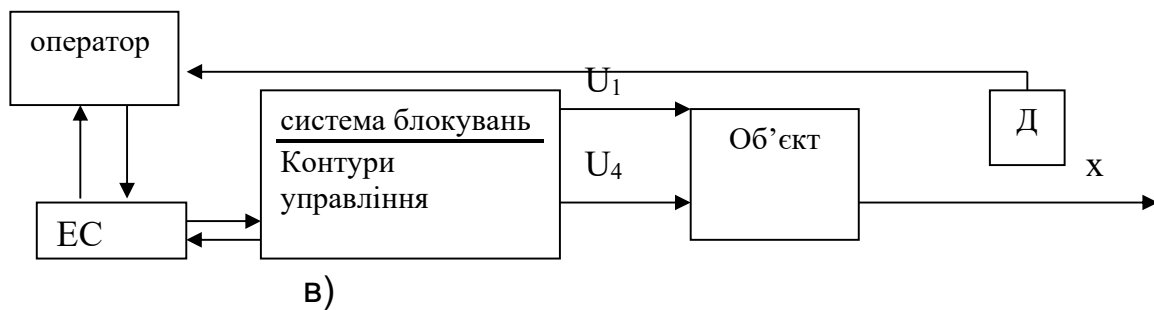
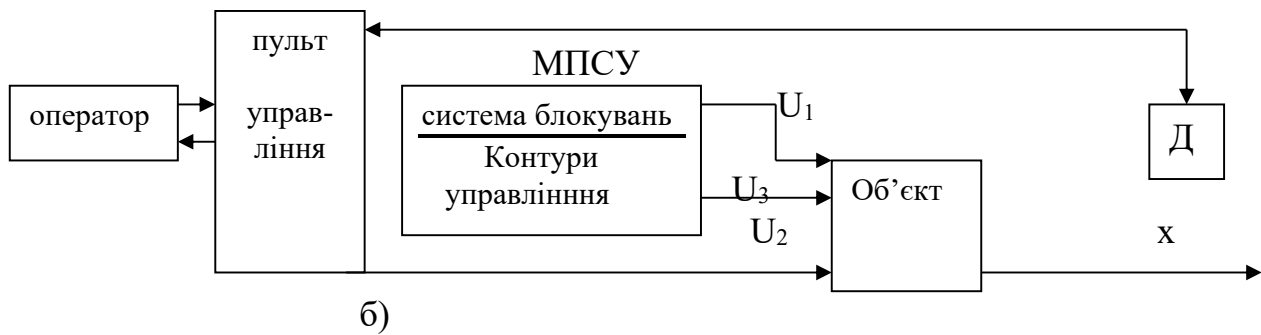


Рис.8.7. Структури автоматичних систем  
а) дистанційне управління оператором; б) автоматизоване управління; в) використання ЕС



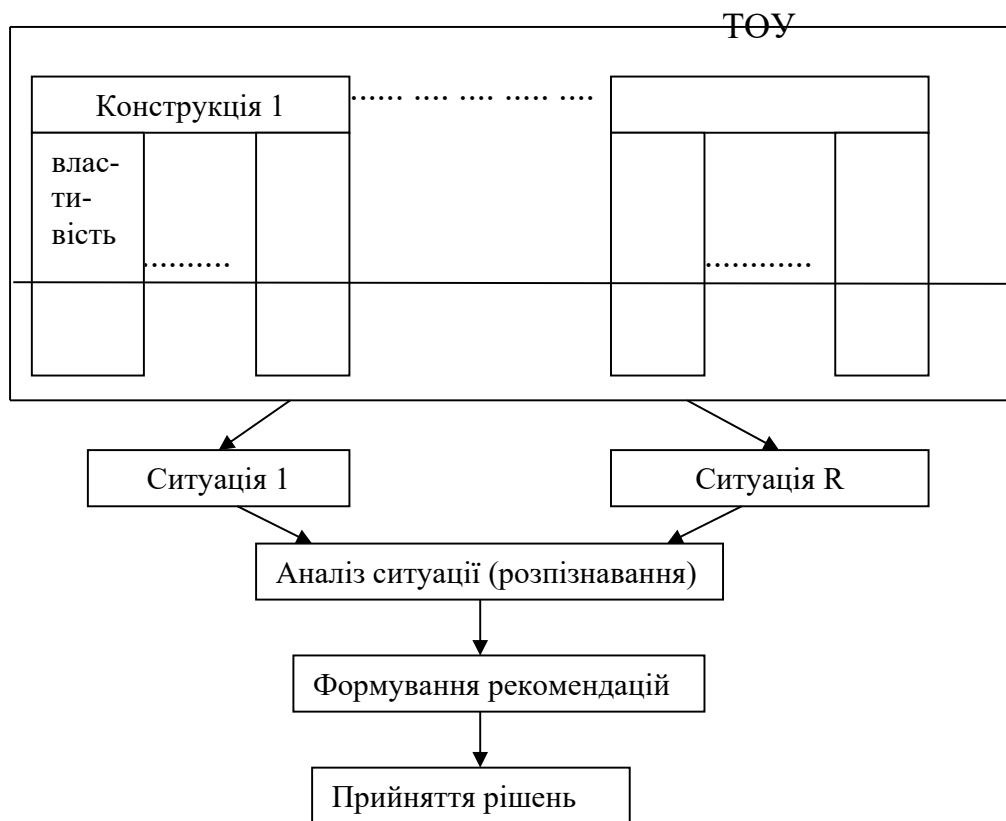


Рис 8.8. Схема предметної області

Каузальність в сценарії: будь-яка попередня дія створює умови для наступної. Використовуються відношення:

- $p_1$  – необхідна і достатня причина;
- $p_2$  – достатня причина;
- $p_3$  – обумовлена причина.

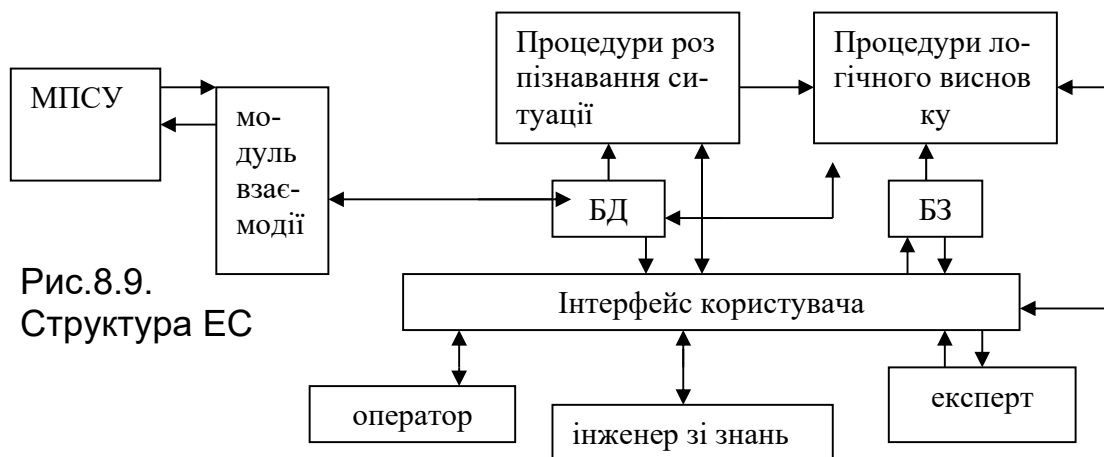


Рис.8.9.  
Структура ЕС

Зводяться множини:

- дій чи рекомендацій

$$D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\};$$

- конструкцій об'єкта

$$K=\{k_1, k_2, \dots, k_l\};$$

- властивостей конструкцій

$$E=\{l_1, l_2, \dots, l_p\};$$

- ситуацій

$$W=\{w_1, w_2, \dots, w_m\};$$

- управлінь

$$U=\{u_1, u_2, \dots, u_q\}.$$

На множині дій допускаються відношення:

$R_1$  - дія  $d_i$  виконується раніше  $d_j$ ;

$R_2$  - дія  $d_i$  є частиною  $d_j$ ;

$R_3$  - дія  $d_i$  приводить до  $d_j$ ;

$R_4$  - дія  $d_i$  супроводжується  $d_j$ ;

Для БЗ використовується список сценаріїв у вигляді фреймів однакової структури.

КСЦ ім'я (каузальний сценарій)

виконавець;

мета;

порядок дій;

ситуації;

умови;

результати.

Можливі схеми міркувань на сценаріях, які використовуються при висновках

1. В КСЦ слот "мета" має дію  $d^* \in D$ , а слот "порядок дій" - список дій  $(d_1, d_2 \dots d_n)$ . Тоді мають місце відношення:

$$(d_i R_1 d^*)(d_i n_3 d^*)(d_i R_2 d^*), i=1, n$$

2. Для кожної дії  $d_i$  слота "порядок дій" виконуються відношення

$$(d_i R_1 d_j), i < j$$

3. Для значення слота «мета»  $d^* \in D$  і значень слота "результати" має місце відношення

$$(U_i R_1 d^*), i=1, q$$

4. Для  $d^* \in D$  (слот "порядок дій") та  $U_i \in U$  (слот "результати") справедливе відношення

$$(d_i R_1 U_j)$$

5. Для кожного  $d_i$  в полі "порядок дій" може існувати КСЦ в полі "мета" якого є  $d_i$ , а в полі "порядок дій"  $(d_1 \dots d_n)$ .

6. Для кожної ситуації  $w \in W$  в слоті "ситуації" та дії  $(d_1 \dots d_n)$  виконується

$$(W_i n_2 d_j), j=1, n$$

7. Якщо для виконання  $d_i$  КСЦ 1 необхідно виконати дії  $(d_1 \dots d_n)$  слота “порядок дій” КСЦ 2, тоді

$$(d_k \text{ пз } d_i), (d_k \text{ R}_2 d_i), \overline{k=1, n}$$

БД описує всі необхідні конструкції об'єкта і представлена одноранговою мережею фреймів, кожний з яких має структуру:

- ім'я конструкції (значення);
- ім'я властивості (значення);
- поточне значення (величина);
- номінальне значення (величина);
- одиниці вимірювань (значення);
- допустима різниця (величина).

### Приклади сценаріїв БЗ

\*Сценарій

КЦЛ Пуск сушильної установки

[Виконавець]

Оператор

[Мета]

Почати процес сушіння

[Порядок дій]

Подати сигнал про пуск

Включити систему вентиляції

Відкрити клапан топочної труби

Почати подачу палива в топку

Включити двигун конвейера сухого вугілля

Включити живильник розвантажувальної камери

.

.  
.  
.  
[Причина]

Розпорядження про пуск СУ

[Умови]

? Чи є дозвіл на пуск

[Результати]

топка – клапан @ закритий

топка – шибер @ відкритий

топка – живильник @ включений

.  
.  
.  
димосос – температура перед @ 100

димосос – температура підшипників @ 40

- КСЦ Зупинка СУ

.  
.  
.  
Процес формування рішення. Етапи:

- розпізнавання ситуації;
- вироблення рекомендацій на основі логічного висновку.

Розпізнавання ситуації – на основі класичної теорії розпізнавання образів. Образ - структурований наближений опис досліджуваного об'єкта (явища), причому існує лише часткова визначеність опису

як ідентичності, схожості, подібності. При цьому співставлення образів – основна задача розпізнавання та штучного інтелекту в цілому.

Для задач управління ТП розпізнавання образів – це визначення технологічної ситуації та віднесення її до певного класу. В цих задачах немає формалізованого опису та використовується різномодна, в тому числі якісна інформація.

Методи розпізнавання:

- моделі з використанням принципу розділення (R – моделі);
- статистичні моделі;
- моделі з використанням методу потенціальних функцій (П моделі);
- моделі обчислення оцінок (Г – моделі);
- методи засновані на алгебрі логіки (Л – моделі).

Основні вимоги до вибору методу – кількість обчислень та час.

Розглянемо модель обчислення оцінок (Г – модель). Постановка задачі:

- дано: множина  $M$  об'єктів  $\omega$  і на цій множині існує розбиття на кінцеве число підмножин (класів)  $\Omega_i$ ,  $i=1, m$ ,  $M = \bigcup_{i=1}^m \Omega_i$ ;

- розбиття визначено не повністю, задана лише деяка інформація  $I_0$  про класи  $\Omega_i$ .
- об'єкти  $\omega$  задаються значеннями деяких ознак  $\overline{X_j}$ ,  $j=1, n$ . Сукупність значень  $X_j$  визначає опис  $I(\omega)$  об'єкта  $\omega$ .
- кожна з ознак може приймати значення з різних множин допустимих значень, наприклад  
 $\{0, 1\}$  – ознака не виконана чи виконана;  
 $\{0, 1, d-1\}$  – ступінь визначеності ознаки має різні градації,  $d>2$

Опис об'єкта  $I(\omega)=(x_1(\omega)...x_n(\omega))$ , називають стандартним, якщо  $x_j(\omega)$  приймає значення з множини допустимих значень.

Тоді задача із стандартною інформацією полягає в тому, щоб для об'єкта  $\omega$  та наборів класів  $\Omega_1...\Omega_m$  за навчаючою інформацією  $I_0(\Omega_1...\Omega_m)$  про класи та описи  $I(\omega)$  обчислити значення предикатів  $P_i(\omega \in \Omega_i)$ ,  $i=1,m$ . Апріорна інформація в задачі розпізнавання з класами, які не перетинаються, може задаватись у вигляді таблиці  $T_{N,M}$ (табл.8.1.)

В основі алгоритмів розпізнавання лежить природній евристичний підхід – принцип прецедентності, тобто прийняття рішення по аналогії – аналогічних ситуаціях діяти однаково.

Один з простих алгоритмів передбачає обчислення оцінок на основі частинної прецедентності, а саме: порівняння опису розпізнаваного об'єкта  $I(\omega')$  з описом об'єктів в  $T_{N,M}$  і визначення класу, до якого цей об'єкт відноситься. Рішення виноситься на основі обчислення ступеню подібності розпізнаваного об'єкта (рядка) з рядками, належність яких до заданих класів відома.

Таблиця 8.1.

Вихідні дані навчання

Об'єкт	$X_1$	$X_j$	$X_n$	Клас
$\omega_1$	$a_{1,1}$	$a_{1,j}$	$a_{1,n}$	$\Omega_1$
$\omega_i$	$a_{i,1}$	$a_{i,j}$	$a_{i,n}$	$\Omega_i$
$\omega_m$	$a_{m,1}$	$a_{m,j}$	$a_{m,n}$	$\Omega_m$
$\omega'$	$b_1$	$b_j$	$b_n$	?

[1, с.122-150, 5, с.180-200]

### Контрольні питання

1. Проблема вибору в складних системах, її риси.
2. В чому полягає вибір на основі критеріїв?
3. Поясніть структуру прийняття рішень з багатоешелонною та багат шаровою ієрархіями
4. Які складові має процес прийняття рішень?
5. Особливості прийняття рішень в умовах визначеності і ризику.
6. Дайте характеристику багатокритеріальних задач прийняття рішень
7. Які згортки критеріїв використовуються при прийнятті рішень?
8. В чому особливість прийняття рішень в умовах невизначеності?
9. Дайте визначення та область застосування систем підтримки прийняття рішень
10. Призначення та склад експертних систем
11. Як відбувається побудова бази знань експертних систем?
12. Що таке каузальні сценарії?
13. В чому полягає прецедентне управління?

## **9. Синтез складних систем управління**

### **9.1. Постановка задачі. Методи архітектурного та системотехнічного синтезу**

Складність об'єктів управління невпинно зростає, що потребує для їх стійкого функціонування все більш складних систем. Тут доцільно навести висновок теореми У.Ешбі "Об'єднана система елементів має більш багатий вибір способів поведінки, ніж система, яка складається із сукупності ізольованих частин". В техніці об'єктивно існує принцип необхідної та достатньої складності: складність системи



управління повинна бути не меншою складності об'єкта або, точніше відповідати їй.

Складність проблеми синтезу складної системи управління полягає в тому, що вона може реалізуватись на різних технічних засобах, з різними зв'язками між ними, в різних структурах. В зв'язку з цим проблема синтезу оптимальної структури складної системи управління в умовах існуючих ресурсів та обмежень зростає настільки, що процедури досягнення поставленої мети не можуть бути формалізовані. Задача синтезу оптимальної структури є багатокритеріальною, тому поставлена мета може реалізуватись різними зв'язками між елементами. Основними задачами при синтезі структури системи є: визначення складу системи; класифікація допустимих варіантів та їх опис; аналіз відношень між можливими сполученнями елементів (підсистем) та визначення можливості застосування системи із змінюваною структурою.

Для складних систем управління технологічними комплексами при синтезі структури виділяють три складові:

- синтез структури об'єкта, виділення підсистем;
- синтез частини системи, в якій реалізуються алгоритми управління, а саме: вибір кількості рівнів, формування ієрархії системи; розподілення функцій між рівнями та елементами; розподілення функцій між операторами та ЕОМ;
- синтез структури системи передачі та обробки інформації.

В практиці створення складних систем управління можна виділити системотехнічний синтез – обґрунтований вибір цілей, функцій та структур за видами забезпечення та архітектурний – вибір функціональних, логічних та фізичних принципів організації системи. Обидві

задачі є слабкоформалізованими, а їх розв'язання потребує творчого підходу.

Зростання кількості систем, які впроваджуються та працюють в промисловості, дає можливість використовувати типові рішення, до яких відносяться ті варіанти, які найкраще себе зарекомендували в процесі експлуатації. Вибір типових рішень часто здійснюють на якісному рівні з лінгвістичними змінними. Вихідними даними для цього є множина характеристик (особливостей) об'єкта  $F$  та вимог до системи управління  $D$ , перелік складових яких може змінюватись та доповнюватись в процесі розв'язання задач синтезу. Для прикладу наведемо перелік складових множин  $F$  та  $D$ .

$F_1$  – топологічні особливості (просторове розміщення обладнання);

$F_2$  – структурні характеристики (особливості зв'язків між агрегатами);

$F_3$  – функціональні вимоги (склад прикладних задач);

$F_4$  – інформаційні потоки (джерела інформації, її форми та повнота);

$F_5$  – алгоритмічні характеристики задач управління (розмірність, повнота формалізації, обчислювальна складність);

$F_6$  – динамічні характеристики об'єкта, в тому числі запізнювання, стійкість, керованість, спостережність;

$F_7$  – режимні особливості (статичні чи динамічні режими, характеристики збурень);

$F_8$  – показники надійності технологічного обладнання, причини відмов та їх наслідки;

$D_1$  – топологічні властивості (просторове розміщення датчиків, споживачів інформації та засобів її переробки);

$D_2$  – структурні особливості (вимоги до структури програмно-технічних засобів);

$D_3$  – функціональні вимоги (характеристики класів задач та їх повнота);

$D_4$  – інформаційні характеристики (форми надання інформації, вимоги до джерел інформації та засобів її зберігання);

$D_5$  – алгоритмічні вимоги (принципи, методи, схеми контролю та управління);

$D_6$  – організаційно-динамічні вимоги (час розв'язання прикладних задач, обслуговування черги заявок, пріоритетність задач);

$D_7$  – вимоги до точності розв'язків задач;

$D_8$  – показники надійності та техніко-економічної ефективності.

Тоді множина системотехнічних характеристик системи знаходиться як системотехнічне відображення  $S$

$$D \times F \rightarrow S, \quad D = \bigcup_i D_i, \quad F = \bigcup_i F_i \quad (9.1)$$

Таким чином, визначаються: просторово-топологічна, функціональна, інформаційна та алгоритмічна структури системи, її місце в загальній системі управління, інформаційна потужність, розподіл функціональних задач між технічними засобами і персоналом, між апаратними та програмними засобами, методи підвищення надійності.

Основні процедури системотехнічного синтезу можна сформулювати так: загальний критерій, наприклад мінімум сумарної довжини ліній зв'язку в системі, доповнюється обмеженнями:

$$\min L = \min \sum_{i,j \in I} L(i,j), \quad (9.2)$$

$$\rho \geq 2; \quad S^T \leq S^T_{\text{доп}}; \quad L(i,j) \leq L(i,j)_{\text{доп}}; \quad v \geq v_{\text{доп}}$$

$$R_q \leq R_{q \max}; \quad q \in V, B,$$

де:  $\rho$  – кількість вузлів (станцій);  $S^T$  – вартість технічних засобів;  
 $L(i,j)$  – довжина лінії зв'язку між  $i$ -тим та  $j$ -тим елементами;  
 $v$  – структурна живучість;  $R_q$  – завантаження  $q$ -го елемента системи;  
 $V$  – функціональні елементи;  $B$  – зв'язки між ними.

## 9.2. Синтез оптимальної технічної структури системи управління

Передбачається, що технічна структура (ТС) оптимальна, коли:

- реалізує набір формалізованих функцій  $F$ , які забезпечують досягнення системою заданої мети  $Q_T$  ( $T$  – для технологічного об'єкта);
- сукупність показників якості  $E$  – найкраща з можливих і її не можна покращити.

Другими словами: повинні забезпечуватись функціональні можливості системи та необхідні показники якості. Вид ТС (централізована, розподілена) визначається оцінкою якості можливих варіантів ТС.

Допустимо: в результаті структурного аналізу ТОУ відомі:

- функціональна структура СУ

$$W(F, U) \tag{9.3}$$

- сукупність з  $\varepsilon$  частинних критеріїв та область їх визначення  $K_0$ .

Задача має велику розмірність, яку можна дещо скоротити за рахунок:

- зведення задачі синтезу ТС СУ до  $m$  задач синтезу структури функціональних підсистем та їх наступного агрегування в систему;
- використання початкової бази даних у вигляді масиву (банка, таблиці) типових маршрутів  $M(x,y)$ .

Тут можуть бути різні підходи, але виділяються три етапи:

- = визначення типу мікропроцесорних засобів та ЕОМ;
- = визначення структури функціональних підсистем;
- = визначення ТС системи на основі відомих підсистем.

Головне: вибір найкращого рішення (альтернативи) – багато-критеріальна задача з використанням сукупності частинних критеріїв та певної процедури прийняття рішень

На рис.9.1 показана декомпозиція цільової функції:

0 рівень – виділення цільової функції для процесу функціонування СУ;

1 рівень – декомпозиція цільової функції за стадіями життєвого циклу:

1 - розробка ТЗ; 2 – розробка документації; 3 – впровадження; 4 – експлуатація.

2 рівень – декомпозиція отриманої підмети на етапі розробки структур:

1 – функціональної; 2 – технічної; 3 – інформаційної; 4 – алгоритмічної; 5 – програмної; 6 – організаційної.

3 рівень – декомпозиція отриманої підмети при розробці ТС для забезпечення:

1 – функціональних можливостей; 2 – якості функціонування; 3 – ресурсів.

4 рівень – формування цілей нижнього рівня і виявлення сукупності факторів, найбільш суттєвих для функціонування СУ.

Використовувані критерії при синтезі ТС повинні:

- бути повними та охоплювати всі суттєві фактори, які впливають на поведінку системи;
- розкладатись, для спрощення процесу прийняття рішень, на етапи;
- не бути надлишковими, щоб розмірність задачі не збільшувалась;

- не дублювати різних аспектів поведінки системи.

Частинними критеріями можуть, наприклад, бути:

стадія розробки документації:

1- якість загальносистемного програмного забезпечення; 2 – якість методичного забезпечення; 3 – зручність замовлення технічних засобів; 4 – різноманітність номенклатури технічних засобів; 5 – досвід проектування СУ на конкретній техніці;

стадія впровадження:

6 – вартість технічних засобів; 7 – затрати на впровадження.

стадія експлуатації:

8 – надійність; 9 – вартість експлуатації; 10 – живучість; 11 – трудоемкість управління; 12 – напруженість праці оператора; 13 – час реакції; 14 – перешкодостійкість; 15 – точність управління; 16 – якість сервісу; 17 – зручність експлуатації.

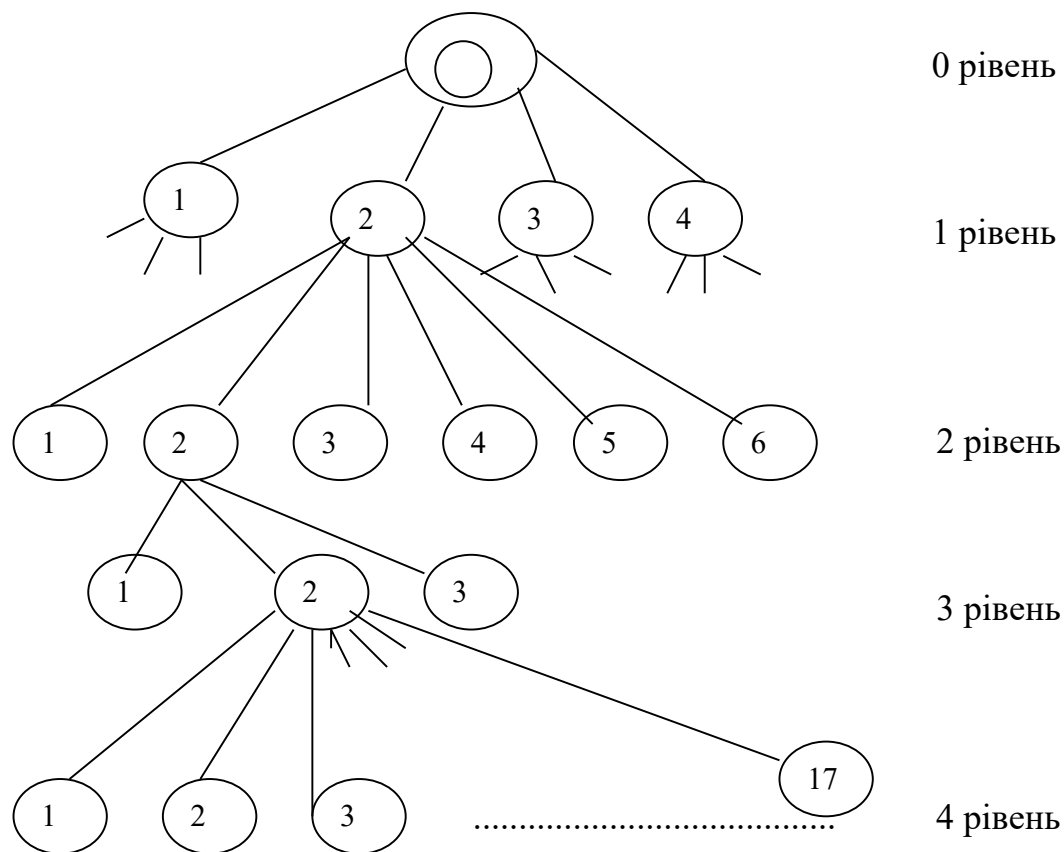


Рис.9.1. Дерево декомпозиції цільової функції системи з виділенням підцелей нижнього рівня

Проблема: частина критеріїв задається кількісно (час реакції, вартість системи, затрати на впровадження), інші – якісно (лінгвістичні змінні) – якість видів забезпечення, сервісу, зручність і т.д. В літературі наведено дані, що процес прийняття рішень не супроводжується помилками, коли для оцінки альтернатив використовується не більше 7-ми критеріїв. При більшій їх кількості вони використовуються на різних стадіях.

При створенні ТС СУ невизначеності викликані:

= поведінкою середовища, в якому буде функціонувати система;

=обмеженнями, пов'язаними з технічними характеристиками ТЗ та ПЗ;

= недостатнім досвідом та значенням факторів, які впливають на якість СУ.

Використовуються такі процедури синтезу. Процедура формування варіантів використання обчислювальної техніки. Основа – аналіз функцій  $f \in F$  та можливості їх реалізації на основі сучасної техніки.

Вибір найкращої альтернативи – на основі критеріїв  $k_1-k_7$  та використання їх згорток.

Синтез структури функціональних підсистем.

Для кожної пари  $X, Y$  ( $x \in X, y \in Y$ ), виділяється типовий маршрут, який забезпечує перетворення  $X$  в  $Y$  ( $m(x, y) \in M(X, Y)$ ). З однотипних маршрутів формується  $\alpha$  варіантів кожної з  $m$  функціональних підсистем

$$G_{i\alpha}(V_i, B_i) = \bigcup_h m_{jk}(x, y) \quad (9.4)$$

$$k=1, \dots, k; \quad j=1, \dots, h; \quad i=1, \dots, m; \quad \alpha=1, \dots, \alpha$$

Основа – критерії  $k_8-k_{11}$ .

Синтез структури системи (ССС). З виділених моделей підсистем шляхом агрегування синтезуються можливі варіанти структури системи (централізована, територіально чи функціонально розподілена, комбінована...)

$$G_\gamma(V_\gamma, B_\gamma) = \bigcup G_{ij}(V_{ij}, B_{ij}) \quad (9.5)$$

$$ш=1, \dots, m; \quad j=1, \dots, \alpha; \quad \gamma=1, \dots, \gamma$$

Основа – критерії  $k_{12}-k_{17}$ .



Якщо ні один з варіантів не відповідає поставленим вимогам, то здійснюється перехід в початок (при  $k_i \notin k_0$ ).

#### Оптимізація технічної структури АТК на графових моделях.

Формально оптимізація – вироблення та реалізація множини стратегій  $R$  (способів дій розробників АСУТП), які визначаються множиною алгоритмів  $R_a = \{r_1, r_2, \dots\}$  процедур проектування для досягнення цільової функції  $Q$ . Реалізація цих стратегій приводить до декомпозиції ТС об'єкта та АСУТП і утворення нових структур з урахуванням множини функцій  $F$  та оцінок  $E$ , які програмують життєвий цикл АТК.

Для ТК:

$$\begin{aligned} \Gamma(M, A) &\xrightarrow{R_1} \bigcup_m \Gamma_i(M_i, A_i) \xrightarrow{R_2} \bar{\Gamma}(\bar{M}, \bar{A}), \\ R_1: M \times A \times F \times E_1 &\rightarrow \bigcup_m \Gamma_i(M_i, A_i) \\ R_2: M_i \times A_i \times E_2 &\rightarrow \bar{\Gamma}(\bar{M}, \bar{A}), \\ R_1, R_2 &\subset R; \quad E_1, E_2 \subset E, \quad i=1, \dots, m, \end{aligned} \quad (9.6)$$

де:  $\bar{\Gamma}(\bar{M}, \bar{A})$  - конденсація графа;  $m$  – число функцій, які реалі-зуються системою.

Для АСУТП:

$$\begin{aligned} G(V, B) &\xrightarrow{R_3} \bigcup_m G_i(V_i, B_i) \xrightarrow{R_4} \bar{\Phi}(\bar{V}, \bar{B}), \\ R_3: V \times B \times E_3 \times F &\rightarrow \bigcup_m G_i(V_i, B_i) \\ R_4: V_i \times B_i \times E_4 &\rightarrow \bar{\Phi}(\bar{V}, \bar{B}), \end{aligned} \quad (9.7)$$

$$R_3, R_4 \subset R; \quad E_3, E_4 \subset E, \quad i=1, \dots, m,$$

де:  $\bar{\Phi}(\bar{V}, \bar{B})$  - укрупнений оргграф ТС СУ, конденсація оргграфа  $G(V, B)$ .

На основі виразів (9.6) і (9.8) задача синтезу оптимальної ТС СУ зводиться до визначення сукупності множин:

$$\langle M, A, V, B, F, E \rangle \quad (9.9)$$

та пошуку єдиного рішення в багатовимірному просторі вибору

$M$  – множина технологічних елементів;

$A$  – множина зв'язків між ними;

$V$  – множина функціональних елементів СУ;

$B$  – множина зв'язків між ними;

$F$  – множина функцій СУ;

$E$  – оцінки життєвого циклу АТК

Тоді оргграф ТС АТК можна привести до виду:

$$O(J, Q) = \bar{\Gamma}(\bar{M}, \bar{A}) \cup \Phi(\bar{V}, \bar{B}), \quad (9.10)$$

$$\Gamma(\bar{M}, \bar{A}) \cap \Phi(\bar{V}, \bar{B}) = \emptyset$$

Відносно стратегій  $R$ :

$R_1$  повинна забезпечувати за допомогою множини оцінок  $E_1$  виділення в ТК  $m$  технологічних підсистем, за допомогою яких через множину  $F$  реалізується функція  $\bar{Q}$ ;

$R_2$  повинна забезпечити за допомогою множини оцінок  $E_2$  компоновку такої структури ТОУ з  $m$  технологічних підсистем, яка б найкраще відповідала  $\bar{Q}$ ,  $E_3$ ,  $E_4$ ;

$R_3$  – вибір найкращого типу елементів для  $m$  підсистем СУ та їх оптимальну конструктивну і логічну компоновку з урахуванням множини оцінок  $E_3$ ;

$R_4 \rightarrow$  синтез оптимальної ТС СУ з урахуванням  $m$  підсистем та множини оцінок  $E_4$ .

Поставлена задача має велику розмірність, відноситься до багатоцільової (векторної) оптимізації в умовах невизначеності

(нечіткості) оцінок Е. Ця задача відноситься до комбінаторних з дискретними змінними.

Один з шляхів розв'язання – це прийняття ряду припущень, а саме:

= реалізуємі функції складаються із задач, що розв'язуються на основі уніфікованих алгоритмів, для яких відомі основні технічні характеристики (час роботи, об'єм пам'яті, число вхідних і вихідних параметрів і т.д.);

= кожна з підсистем ТОУ (ТК) має свої критерії, моделі, а в сукупності підсистеми реалізують задану мету управління;

= часто зручно приймати, що кожна з  $m$  функцій реалізується своєю функціональною підсистемою.

### **9.3. Застосування штучних нейронних мереж в системах управління**

Штучні нейронні мережі (НМ) почали досліджуватись в 60-і роки в біонічному напрямку в кібернетиці. Сьогодні вони застосовуються в різних галузях промисловості (енергетика, хімія, авіаційне приладобудування...). Основа – високий рівень розвитку електроніки і обчислювальної техніки, створення цифрових нейромережових СБИС з числом нейронних елементів на одному кристалі порядку 1000 і більше. Крім того, фундаментальною базою є дослідження в нейробіології, в нейрофізіології, біофізиці, біохімії, що дали матеріал для вивчення динаміки нелінійних нейронних процесів.

Штучні НМ - клас параметризованих функціональних структур, властивості яких визначаються коефіцієнтами зв'язку між нейронними елементами та параметрами їх характеристик перетворення. Нейронні

елементи описуються нелінійними статичними функціями або диференційними рівняннями конкурентного типу. Допускаються довільні зв'язки між нейронами, але на практиці застосовуються, як правило, регулярні багатошарові нейроструктури з повними або частинними зв'язками між шарами та матричною пошаровою організацією нейронів. Характерна ознака функціонування нейромережових структур – настройка коефіцієнтів міжнейронних зв'язків, необхідна для отримання заданих динамічних характеристик перетворення вхідних даних в умовах невизначеності чи змінюваного середовища, що визначає їх застосування в адаптивних системах.

Крім того, це:

- автоматизація процесів розпізнавання образів;
- створення експертних систем;
- організація асоціативної пам'яті і інш.;
- прогнозування показників біржового ринку.

Найбільш ефективно нейронні мережі застосовуються при побудові систем адаптивного управління в умовах апіорної невизначеності та змінюваних характеристик зовнішнього середовища. Це визначається їх функціональними властивостями:

- можливість перебудови;
- нелінійністю динаміки і кооперативності міжнейронної взаємодії, що визначає складні оператори перетворення вхідної інформації;
- паралельністю роботи нейронів, що важливо при апаратній реалізації нейромережових регуляторів.

Терміни і поняття. Основа кожної нейронної мережі – однотипні елементи, які імітують роботу нейронів мозку (рис. 9.2).

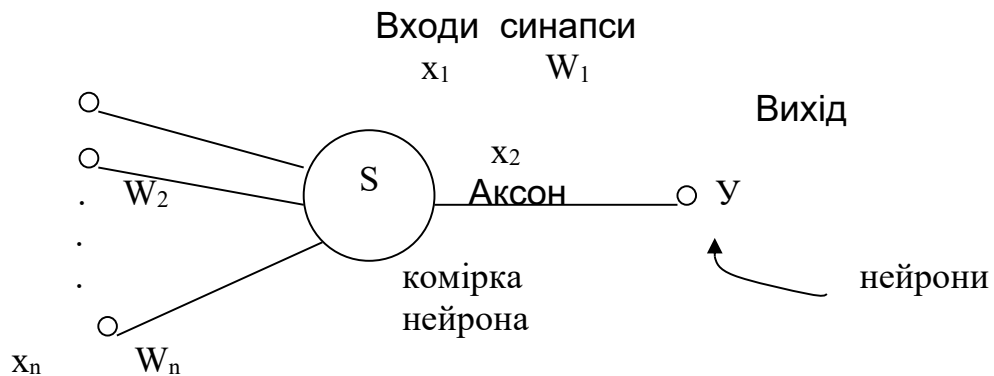


Рис.9.2. Схема нейрона

$$S = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (9.11)$$

$$Y = F(S) \quad (9.12)$$

Кожний нейрон характеризується поточним станом за аналогією з нервовими клітинами головного мозку:

- можуть бути збуджені;
- можуть бути загальмовані

Нейрон має групу синапсів – однонаправлених вхідних зв'язків, зв'язаних з виходами інших нейронів, та аксон – вихідний зв'язок даного нейрона, з якого сигнал (збудження або гальмування) надходить на синапси наступних нейронів. Кожний синапс характеризується розміром синаптичного зв'язку або його вагою  $W_i$ , що за фізичним змістом еквівалентний електричній провідності (рис.9.2).

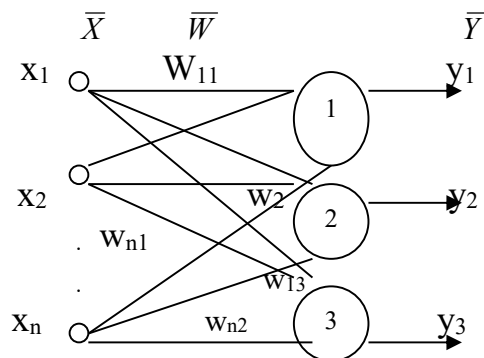


Рис.9.3. Схема зв'язків нейрона

Велике число нейронів об'єднуються в так звані прошарки і з'єднання певним чином нейронів різних прошарків, а в деяких конфігураціях – нейронів одного прошарку між собою. Обробка взаємодії нейронів ведеться пошарово.

Теоретично кількість прошарків і число нейронів у кожному прошарку може бути довільним, але фактично воно обмежено ресурсами комп'ютера чи спеціалізованої мікросхеми, на яких реалізуються НМ.

Вибір структури НМ здійснюється відповідно до особливостей і складності задачі, для стандартних задач існують оптимальні конфігурації.

При розробці нових конфігурацій необхідно враховувати такі принципи:

- можливості мережі зростають із збільшенням числа осередків, щільності зв'язків між ними і числом виділених прошарків;
- введення зворотніх зв'язків збільшує можливості системи, але виникає проблема динамічної стійкості;

- вдосконалення алгоритмів функціонування мережі, наприклад введення кількох типів синапсів (збуджуючих, гальмівних) сприяє зростанню потужності НМ.

Процес функціонування НМ, тобто сукупність виконуваних дій, залежить від розмірів синаптичних зв'язків. Для конкретної структури НМ (під конкретну задачу) необхідно знайти оптимальні значення змінних вагомих коефіцієнтів (деякі синаптичні зв'язки можуть бути постійними). Цей етап – навчання НМ, коли розв'язується компромісна задача вибору параметрів ваг та часом навчання. Навчання може проводитись “з вчителем” або без нього. В першому випадку мережі задаються значення вхідних і бажаних вихідних сигналів. В другому – виходи НМ формуються самостійно, а ваги змінюються за алгоритмом, який враховує вхідні сигнали і похідні від них.

Алгоритми навчання поділяються на класи:

- детерміновані, коли підстроювання ваг проводиться за жорсткою послідовністю дій;
- стохастичні, коли підстроювання підпорядковується деякому випадковому процесу;

НМ можуть оперувати двійковими сигналами (бінарні) або неперервними (аналогові).

НМ можуть бути:

- синхронними, коли стан змінює лише один нейрон;
- асинхронними, коли змінюється стан групи нейронів у про- шарку.

### Адаптивна система управління на базі НМ персептронного типу

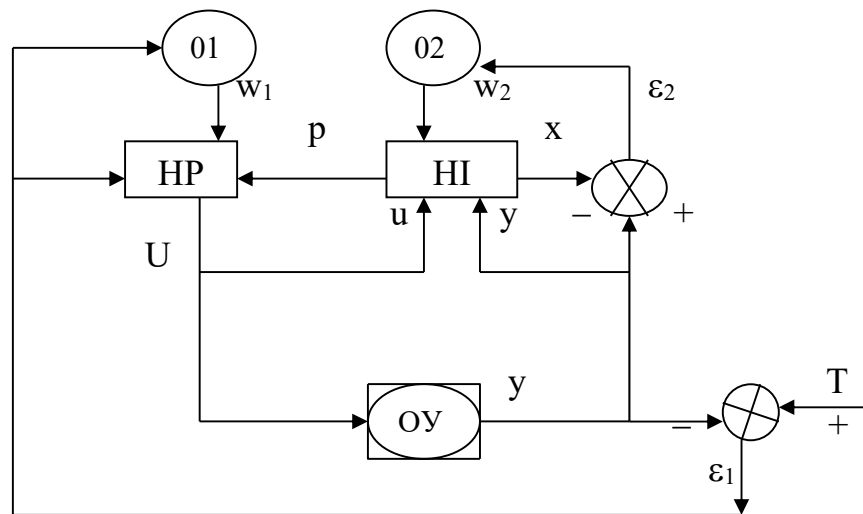


Рис.9.4. Структура системи

$w_1, w_2$  – векторні коефіцієнти зв'язку;

$T$  (target) – завдання;

НР – неймережовий регулятор;

НІ – неймережовий ідентифікатор;

ОУ – об'єкт;

$P$  – дані прогнозів.

Система відпрацьовує завдання  $T$ . Неймережовий регулятор НР на основі кінцевої послідовності попередніх значень сигналу похибки управління  $\varepsilon_1 = T - U$  та даних прогнозу  $p$  формує  $u$ . Неймережовий ідентифікатор НІ обробляє сигнали  $u$  і  $y$  та формує вихідний сигнал  $x$ , який порівнюється з  $y$ .

Оптимізатори 01 і 02 в процесі навчання НМ обробляють сигнали помилки  $\varepsilon_1 = T - U$  і  $\varepsilon_2 = y - x$  (управління та ідентифікації), визначають векторні коефіцієнти зв'язку  $w_1$  і  $w_2$  нейронних мереж НР і НІ. В



результаті навчання формуються структура нейрорегулятора НР і модель об'єкта.

Багатошарова НМ за топологією - дискретна решітка з визначеними числами шарів і нейронів в кожному з них. Конфігурація мережі обирається з урахуванням складності розв'язуваної задачі. Для опису нейронів використовується функціональна модель:

$$Y_{im} = f(Z_{im}), \quad i=1, \dots, s; \quad m=1, \dots, n \quad (9.13)$$

$$Z_{im} = \sum_{k=1}^n W_{ijmk} Y_{jk}, \quad i, j=1, \dots, s; \quad k=1, \dots, n$$

$Y_{im}$  – вихідна величина  $m$ -го нейрона в  $i$ -му шарі;

$Z_{im}$  – величина внутрішнього стану активності на вході  $m$ -го нейрона в  $i$ -му шарі;

$Y_{ik}$  – вихідна величина  $k$ -го нейрона попереднього  $j$ -го шару;

$W_{ijmk}$  – коефіцієнт зв'язку між  $m$ -м та  $k$ -м нейронами відповідних шарів;

$S$  – кількість шарів;

$n$  – число нейронів в шарі;

$f(\cdot)$  – нелінійна функція перетворення (функція активації), наприклад логістичного типу:

$$y = p_1 / (1 + \exp(-p_2(z - p_3))), \quad p_1 > 0, \quad p_2 > 0 \quad (9.14)$$

$p_1$  – параметр, який визначає максимальний рівень активності на виході нейрона;

$p_2$  – параметр крутизни логіста;

$p_3$  – параметр крутизни зсуву.

Залежність (9.13) в спрощеному вигляді описує механізм синаптичного зв'язку між нейронами. ММ нейронної мережі в цілому опи-сується у вигляді узагальненого ряду Колмогорова-Габара –

дискретний аналог нелінійного інтегрального оператора Вольтерра.  
Для НМ (рис.9.4) модель має вигляд:

$$\begin{aligned}
 U[t] = & \sum_{i=0}^m a_i \varepsilon[t-i] + \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m a_{ij} \varepsilon[t-i] \varepsilon[t-j] + \\
 & + \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^m a_{ijk} \varepsilon[t-i] \varepsilon[t-j] \varepsilon[t-k] + \dots
 \end{aligned}
 \tag{9.15}$$

$U[t]$  – значення виходу НР в поточний дискретний момент часу  $t$ ;

$\varepsilon[t-i]$  – значення помилки управління в попередній момент часу  $[t-i]$ -й;

$m$  – число інтервалів часу;

$a_i$ ,  $a_{ij}$ ,  $a_{ijk}$  – коефіцієнти ряду, які залежать від дискретних параметрів конфігурації мережі і коефіцієнтів міжнейронного зв'язку.

З виразу (9.15) видно, що нейронна мережа здатна враховувати нелінійні ефекти в інформаційних процесах, що підвищує ефективність обробки даних.

Одна з головних проблем – настроювання коефіцієнтів зв'язку. Для цього можуть використовуватись процедури глобальної оптимізації, з урахуванням складного рельєфа цільової функції в багатовимірному параметричному пристрої коефіцієнтів зв'язку. В самій НМ динамічні процеси протікають порівняно швидко, а процеси оптимального настроювання параметрів є збіжними, але порівняно повільними. В системі можуть виникати численні рухи ("блуждання"), що приводить до перерегулювання.

В зв'язку з цим спочатку проводять навчання нейромережевого регулятора:

- на моделі об'єкта;

або: - в діючій системі при підключеному промисловому регуляторі (рис.9.5).

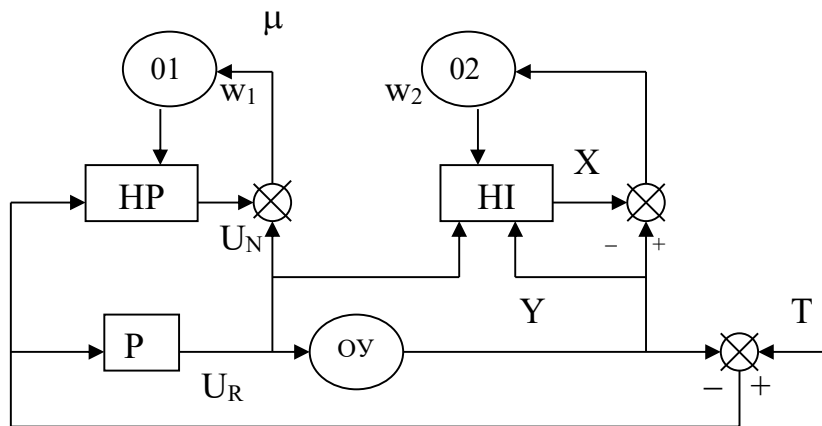


Рис.9.5. Схема системи з діючим регулятором

Оптимізатор 01 отримує сигнал  $\mu = U_R - U_N$ , за яким проводить настройку коефіцієнтів зв'язку нейромережевого регулятора HP. Одночасно настроюється модель об'єкта в нейромережевому ідентифікаторі HI. Після закінчення процесу попереднього настроювання замість регулятора P підключається нейромережевий регулятор HP.

Може виникнути ситуація, коли в об'єкті відбуваються стрибкоподібні зміни структури, тоді необхідно передбачити реалізацію спеціальних режимів перенавчання нейронних мереж для уникнення значних похибок регулювання. Це може бути додаткова нейронна мережа для діагностики та відпрацювання аварійних ситуацій.

В НМ із самоорганізацією проблема настройки параметрів мережі розв'язується по-іншому: замість процедури оптимізації використовуються статичні та динамічні моделі механізмів конкуренції між нейронами, а коефіцієнти міжнейронних зв'язків визначаються за

значеннями поточного стану активності нейронів. Динамічна модель конкурентного типу описується системою нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dz_{im}}{dt} = Z_{im} \left( \sum_{k=1}^n C_{ijmk} X_{jk} - Z_{im} \right), & C_{ijmk} = \frac{W_{ijmk}}{\sum_{k=1}^n W_{ijmk}}; & \sum_{k=1}^n C_{ijmk} \\ \frac{dY_{im}}{dt} = K_{im} Y_{im} \left( Z_{im} - \sum_{k=1}^n b_{ik} Z_{ik} \right), & b_{ik} = \frac{Y_{ik}}{\sum_{k=1}^n Y_{ik}}; & \sum_{k=1}^m b_{ik} = 1 \\ X_{im} = g(Y_{im}), & i, j = 1, \dots, S; & m = 1, \dots, n \end{cases} \quad (9.16)$$

$Z_{im}$  – величина внутрішнього стану активності на вході  $m$ -го нейрона  $i$ -го шару;

$X_{jk}$  – вихідна величина  $k$ -го нейрона попереднього  $j$ -го шару;

$Y_{im}$  – величина активності  $m$ -го нейрона  $i$ -го шару в процесі конкурентної взаємодії;

$X_{im}$  – вихідна величина  $m$ -го нейрону  $i$ -го шару;

$W_{ijmk}$ ,  $C_{ijmk}$  – відповідно ваговий та нормований ваговий коефіцієнти зв'язку між  $m$ -ним та  $k$ -тим нейронами в  $i$ -му та  $j$ -му шарах;

$b_{ik}$  – ваговий коефіцієнт внутрішньошарового гальмування  $k$ -го нейрона  $i$ -го шару;

$K_{im}$  – кінетичний коефіцієнт швидкості зміни активності  $m$ -го нейрона  $i$ -го шару;

$g(\cdot)$  – нелінійна функція обмеження.

Процеси настроювання коефіцієнтів міжнейронного зв'язку в НМ із самоорганізацією можуть описуватись рівняннями, які визначають

різні типи кривих росту рівня провідності синаптичних контактів між нейронами, які взаємодіють:

$$\frac{dW_{ijmk}}{dt} = Z_{im} X_{jk} - W_{ijmk}; \quad i, j=1, \dots, s; \quad m, k=1, \dots, n \quad (9.17)$$

або:

$$\frac{dW_{ijmk}}{dt} = W_{ijmk} (Z_{im} X_{jk} - W_{ijmk}) \quad (9.18)$$

$Z_{im}$  – величина внутрішнього стану активності  $m$ -го нейрона в  $i$ -му шарі;

$X_{jk}$  – вихідна величина  $k$ -го нейрона в  $j$ -му шарі.

В результаті конкурентної взаємодії в процесі самоорганізації в НМ встановлюється певний розподіл активності нейронних елементів, який характеризує реакцію мережі на вхідне діяння. Динамічні рівняння, які описують стан НМ, можна розглядати як рівняння руху, які відповідають потенціальній функції, що визначає функціонал бажаної поведінки нейромережевої системи. Це може бути, наприклад, функціонал оптимальності управління або мінімум ентropії в деякій “синергетичній машині” для управління НМ в задачах розпізнавання образів.

Приклад: для системи (рис.9.3), яка відпрацьовує заданий сигнал в умовах імпульсного діяння зовнішнього середовища, що приводить до збільшення інерційності об’єкта. НМ нейромережевого регулятора складається з п’яти шарів, в кожному з яких 8,5, 5,5 і 1 нейрони відповідно. Нейроідентифікатор має три шари з числом нейронів 7,4,1. Початкова модель об’єкта – послідовно з’єднані інерційна та коливальна ланки:

$$\begin{cases} \frac{dY_1}{dt} + a_1 y_1 = k_1 x; & a_1 = 3; & k_1 = 3 \\ \frac{d^2 Y_2}{dt^2} + b_1 \frac{dY_2}{dt} + b_2 y_2 = k_2 y_1; & b_1 = 8; & b_2 = 400; & k_2 = 80 \end{cases} \quad (9.19)$$

На вхід подавався вхідний сигнал

$$T(t) = \sin \{ [0,045 + 0,1 \sin (0,1t)] t \} \quad (9.20)$$

В алгоритмах навчання НМ використані біологічні механізми типу флуктуація-мутація-відбір.

Якщо відбуваються структурні зміни в об'єкті, то система з ПІД-регулятором стає нестійкою. Класичний регулятор задовільно працює в стаціонарних умовах, а нейромережовий – в умовах адаптації. Швидкість збіжності адаптивних процесів навчання залежить від:

конфігурації мережі;

алгоритмів настроювання;

величини відхилень від умов нормальної роботи;

**Висновок:** Нейрокомп'ютерні системи мають найширше застосування при управлінні складними нелінійними об'єктами в умовах невизначеності і нестационарності.

Апаратна реалізація нейрообчислювальних керуючих систем.

Для роботи в реальному масштабі часу в умовах значних об'ємів оброблюваної інформації виникає необхідність виконання векторно-матричних операцій високої розмірності. Для цього в РЧ необхідно використовувати обчислювальні системи з паралельною обробкою даних, в першу чергу нейрокомп'ютери.

Проблеми нейрокомп'ютерів почали обговорювати приблизно 50 років тому, але практична реалізація налічує буквально одиниці. В останній час знову виник підвищений попит на цю галузь, в 1998р. в

ІПУ РАН відбулась IV конференція “Нейрокомп’ютери та їх застосування”, багато матеріалів в Internet.

Нейрообчислювальний пристрій – система, орієнтована на реалізацію нейромережових алгоритмів. Головна особливість нейрокомп’ютерів – забезпечення високого паралелізму обчислень шляхом застосування спеціалізованого нейромережового логічного базиса або спеціальних архітектурних рішень.

Реалізація нейромережових алгоритмів в цьому базисі дає можливість різко збільшити продуктивність (швидкодію) систем управління. Є багато визначень нейрокомп’ютера, але зручно розуміти під цим обчислювальну систему з MSIMD – архітектурою (обчислювальний пристрій з одним потоком команд та множинним потоком даних).

Цифрові нейрокомп’ютери розробляються в таких напрямках:

- програмна емуляція нейромережових алгоритмів на основі звичайних обчислювальних мереж та ППЗ моделювання НМ;
- програмно-апаратна емуляція НМ на основі стандартних обчислювальних засобів з підключенням віртуального нейромережового блока, який виконує основні нейрооперації та відповідним ППЗ;
- апаратна реалізація НМ.

Найбільший ефект – при реалізації апаратними засобами, але це висока вартість і сьогодні існують одиничні спеціалізовані системи для конкретних задач. Наприклад, нейрокомп’ютер “Synaps 1” – представник нейрокомп’ютерів третього напрямку – має мультипроцесорну архітектуру, оригінальну будова підсистем пам’яті,

а для виконання обчислювальних операцій застосовані сигнальні процесори матричного типу.

Продуктивність (швидкодія) нейрокомп'ютера дякуючи цьому – декілька мільярдів операц./сек. (множення та додавання).

Програмне забезпечення – операційна система “ Synaps 1” з бібліотекою алгоритмів, а також ППЗ:

- базова бібліотека НМ;
- компілятор мови програмування нейроалгоритмів (nAPL);
- набір бібліотечних функцій для C++ і т.д.

Прикладні дослідження показали, що нейрокомп'ютери третього напрямку дозволяють підвищити продуктивність (швидкодію) звичайних обчислювальних систем мінімум на три порядки і моделювати НМ з мільйонами з'єднань. Нейрокомп'ютер “ Synaps 1” дає можливість моделювати нейромережу з 64 млн з'єднань (синапсів) з використанням різноманітних активаційних функцій. Можна очікувати, що в подальшому з розвитком технології виробництва нейрочипів вартість обчислювальних систем буде зменшуватись, розширюватись область їх застосування. Найбільш поширений зараз нейрокомп'ютер “ Synaps 3”.

Апаратна реалізація нейрообчислювального апаратно-програмного комплексу (АПК). АПК призначений для реалізації нейромережових алгоритмів. Для обробки сигналів АПК включає комплект датчиків і інтерфейсну плату (плати), що забезпечує спряження блоків датчиків з керуючою ЕОМ та первинну обробку інформації. В загальному випадку для апаратно-вимірювальних засобів застосовуються спеціалізований зовнішній контролер, з'єднаний з керуючою ЕОМ через інтерфейс IEEE-488, VXI bus, RS-



485,-232 і т.д., а також віртуальний апаратний вимірювальний засіб, який може функціонувати лише тоді, коли приєднується до материнської плати ЕОМ через системну шину, наприклад ISA, EISA, PCI, Multibus, VMEbus і інше.

Попередня обробка інформації та формування сигналів управління зараз може здійснюватись інтерфейсними платами на основі сигнальних процесорів.

Основна умова ефективної роботи АПК – забезпечення РМЧ, коли система реагує на подію раніше, ніж наступить чергово подія.

Нейрообчислювальний блок може реалізуватись на основі:

- стандартного CISC мікропроцесора. Це фактично нейроемулятор і паралельні операції в РМУ не виконуються;
- сигнальних процесорів або спеціалізованого нейромережового логічного базиса.

В залежності від застосовуваних спеціалізованих засобів

нейрообробки виділяють АПК:

- з функціями нейроемулятора;
- на базі каскадного з'єднання сигнальних процесорів;
- нейрокомп'ютери (на основі нейромережового логічного базису).

#### 9.4. Методи реінжинірінгу при створенні складних систем управління

**Це поняття зв'язане в першу чергу з появою нових інтелектуальних технологій, комп'ютерних та програмних засобів.**

Реінжинірінг - реорганізація господарчих та інженерних систем з метою підвищення їх ефективності.

Реінжинірінг бізнес-процесів проводиться у випадках:

- компанія знаходиться на межі краху, її товари дорожчі і гірші, ніж у конкурентів, вибору не існує – може бути розорення;
- керівництво компанії прогнозує розвиток ситуації, появу можливих конкурентів, завбачливо проводить реінжинірінг;
- компанія-лідер не має проблем, проводить агресивну політику, але за допомогою реінжинірінгу забезпечує майбутнє.

Основні положення реінжинірінга бізнес-процесів:

- необхідно знизити вартість бізнес-процесів, скоротити надлишкові внутрішні витрати, підвищити ефективність праці співробітників;
- для виживання в нових умовах фірма повинна постійно адаптуватись до змінюваних обставин. Саме тут потрібен реінжинірінг;
- компанія (фірма) не може бути постійною, вона повинна постійно змінюватись і вдосконалюватись;
- реінжинірінг бізнесу передбачає новий спосіб мислення – погляд на побудову компанії як на інженерну діяльність: сама компанія і її бізнес розглядаються як дещо, що можна побудувати, спроектувати або перепроєктувати у відповідності з інженерними принципами.

Хаммер (1993р.):

“Реінжинірінг – фундаментальне переосмислення та радикальне перепроєктування ділових процесів для досягнення різких (стрибко-подібних) покращень в вирішальних, сучасних напрямках діяльності (вартість, якість, сервіс, темпи)”.

Різниця між вдосконаленням та реінжинірінгом:

Параметр	Вдосконалення	Реінжинирінг
Рівень змін	поступовий	Радикальний
Початкова точка	існуючий процес	"чиста дошка"
Частота змін	неперервно (одноразовий)	Одноразовий
Потрібний час	короткий	Тривалий
Напрямок	знизу догори	зверху – вниз
Охоплення	Вузьке, на рівні функцій	Широке, міжфункціональне
Ризик	помірний	Високий
Основний засіб	Статистичне управління	Інформаційні технології

Часто зустрічається помилка – компанія намагається за допомогою інформаційних технологій автоматизувати існуючі процеси та структури. Це не тільки не дає бажаного ефекту, а й блокує перебудову, зберігає застарілі фірми. Замість правила: “Як використати нові технології, щоб покращити те, що є?” повинно бути: “Як за допомогою інформаційних технологій зробити те, що ще не робили?”.

Моделювання бізнес-процесів. Найбільш потужним інструментальним засобом для побудови динамічних моделей організацій є динамічна інтелектуальна система моделювання Re Think, побудована на основі інтелектуальної системи G2 фірми Gensym (USA). Це проблемно-орієнтоване прикладення (застосування)

комплексу G2, яке дозволяє розробникам використовувати не лише спеціалізовані засоби моделювання бізнес-процесів, а й універсальні засоби комплексу із створення інтелектуальних об'єктно-орієнтованих систем управління реального часу. Для подання моделей бізнес-процесів використовуються діаграми, які складаються з блоків і з'єднань. Блоки – це задачі в бізнес-процесах, а з'єднання – потоки: документів, інформації, а також матеріалів, запасних частин і т.д.

Основа реінжинірінга – системний аналіз.

### **9.5. Методи дослідження операцій в системному аналізі**

Дослідження операцій – один з основних витоків, джерел системного аналізу. Термін “дослідження операцій” виник на тому факті, що задачі широкого класу, які виникли в різних сферах діяльності людини при якісних відмінностях мають одне спільне: вони зводяться до вибору способу дій, варіантів плану, параметрів конструкції і. т.д., тобто до прийняття рішень. Потрібна була єдина теорія та система методів, а “операція” – будь-яка цілеспрямована дія. В операції завжди є суб'єкт (оперуюча сторона), який формулює мету операції і в інтересах якого вона проводиться. Мета операції - це деякий зовнішній (екзогенний) елемент - вважається заданою. Є ще дослідник операцій, який діє в інтересах оперуючої сторони, а його головна задача - знаходження способів використання ресурсів для досягнення мети. В роботах по дослідженню операцій є математичні, методологічні, присвячені конкретним операціям в економіці, сільському господарстві, військовій справі, проектуванні і т.д.

Дослідження операцій як наукова дисципліна сформувалась в повоєнні роки, але починалась вона значно раніше, а задачі належали самим видам діяльності:

- теорія ефективності технічних систем – оптимізація параметрів конструкцій (Вентцель Д.А., Пугачев В.С.);
- задача про оптимальний розподіл інвестицій (1927р., Ф.Рамсей);
- теорія масового обслуговування (Хінчін А.М., Гнеденко Б.В., 30-і роки);
- військові задачі (Англія, США, під час війни);
- формування концептуальних начал (Гермейер Ю.Б.);

В дослідженні операцій можна виділити три головних напрямки, це три етапи, які завжди є в дослідженні:

1. Побудова моделі, формалізація досліджуваного процесу чи явища.

(не операцій!)

За допомогою однієї і тієї ж моделі можна вивчати різні операції

2. Опис операції – постановка задачі. Мету операції формулює оперуюча сторона (суб'єкт, асоційований з системою).

Мета операції завжди є екзогенним (зовнішнім) фактором по відношенні до операцій і повинна бути формалізованою. Формується оптимізаційна задача

$$f(x) \rightarrow \max, x \in G$$

$x$  – елемент нормованого простору  $E$ , який визначається природою моделі;

$G \subset E$  – множина, яка може мати як завгодно складну природу, яка визначається структурою моделі та особливостями досліджуваної операції.

3. Розв'язок оптимізаційної задачі. Розуміючи під операцією будь-яку цілеспрямовану дію, “моделлю операції” є сукупність:

- суб'єкта (оперуючої сторони), який формує мету операції;
- запасу активних засобів (ресурсів) для проведення операцій;
- набору стратегій, тобто способів використання ресурсів;
- критерію – способа порівняння різних стратегій. Він часто і є метою операції.

#### Типові задачі дослідження операцій:

##### 1. Транспортна задача

$a_1, a_2, \dots, a_n$  – склади товарів,

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – кількість товарів,

$b_1, b_2, \dots, b_m$  – споживачі,

$y_1, y_2, \dots, y_m$  – потрібні споживачам товари,

Позначимо  $d_{ij}$  – вартість перевезення одиниці вантажу між  $a_i$  і  $b_j$ ;

$x_{ij}$  – кількість вантажу, який перевозиться з  $a_i$  в пункт  $b_j$ .

$$\sum x_{ij} \geq y_i, \quad (9.21)$$

Але на складі є лише певна кількість товару, тому:

$$\sum x_{ij} \leq x_i, \quad (9.22)$$

Є безліч розв'язків задачі за умов (1) і (2). Тому формується критерій, одним з варіантів якого є вартість перевезень:

$$I(x) = \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (9.23)$$

Тепер необхідно знайти  $x_{ij} \geq 0$  для  $I(x) \rightarrow \min$ .

2. Задача розподілення добрив. Розглядається розподілення обмеженої кількості добрив між посівами  $\Pi$  культур. Припускається, що врожайність  $f_i(x_i)$   $i$ -ої культури – нелінійна функція від  $x_i$  – внесених добрив на одиницю площі. Тоді врожай  $i$ -ої культури буде  $S_i f_i(x_i)$ ,  $S_i$  – площа. Сумарна площа фіксована:

$$\sum_{i=1}^n S_i \leq S - \text{задане число} \quad (9.24)$$

Задається асортимент:

$$\frac{S_i f_i(x_i)}{S_1 f_1(x_1)} = \lambda_i, \quad i=\overline{1,n} \quad (9.25)$$

та обмеження:

$$\sum_{i=1}^n S_i x_i \leq X, \text{ сумарна кількість добрив} \quad (9.26)$$

Змінюючи  $x_i$ ,  $S_i$  за умов (9.24)-(9.26) можна отримати множину варіантів використання площі  $S$ . Для вибору варіантів - критерій, наприклад сумарний дохід за відрахуванням витрат на добриво:

$$I(x,s) = \sum_{i=1}^n (p_i S_i f_i(x_i) - q S_i x_i) \quad (9.27)$$

$$X = x_1, \dots, x_n; \quad S = s_1, \dots, s_n$$

$p_i$  – ціна продукції;

$q$  – ціна одиниці добрив.

Тоді необхідно забезпечити  $I(x,s) \rightarrow \max$  при обмеженнях (4)-(6), в тому числі можна шукати  $X$ .

3. Задача складання розкладу. Це цілий напрямок в дискретній математиці. Скласти розклад робіт, це: обрати їх черговість; виділити ресурси – складна техніко-економічна задача.

4. Задача розміщення складів і інш.

Всі ці задачі – задачі математичного програмування (лінійного – перша, чи нелінійного – друга). Задача 3 – цілочисленого програмування.

Опустимо математичні аспекти, а розглянемо складність задач, пов'язаних з можливістю порівняння різних варіантів на основі різних показників – невизначеність цілей. Подолати це формальними методами неможливо, тому потрібні додаткові дослідження та гіпотези.

Можуть бути ускладнення і при формуванні критерію. Наприклад, критерій

$$I(x, \xi) = f(x, \xi) \quad (9.28)$$

$\xi$  – випадковий параметр з відомими законами розподілення;

$x$  – вектор конструктивних характеристик створюваної системи.

Як правило, намагаються:

$$I(x, \xi) \rightarrow \max_x \quad (9.29)$$

Але це можливо лише за умови, коли фіксується значення  $\xi$ . Тоді кожному значенню  $\xi$  співставляється значення  $x = \hat{x}(\xi)$  – оптимальна стратегія при відомому  $\xi$ .

Можливі підходи, коли використовується математичне сподівання критерію

$$I_1 = M[f(x, \xi)] \rightarrow \max_x \quad (9.30)$$

або дисперсія:

$$I_2 = M[f_{\text{зад}}(x, \xi) - f(x, \xi)^2] \quad (9.31)$$

[1, с.151-173; 2, с.170-181; 5, с. 134-139]



### **Контрольні питання**

1. Сформулюйте постановку задачі синтезу складної системи управління.
2. В чому полягає зміст архітектурного та системотехнічного синтезу складної системи управління?
3. Як формалізується задача синтезу складної системи управління на основі мінімізації сумарної довжини ліній зв'язку?
4. Як складається дерево цілей для задачі синтезу оптимальної технічної структури системи управління?
5. Які критерії використовуються в задачі синтезу оптимальної технічної структури системи управління?
6. Як використовуються графові моделі в задачі синтезу оптимальної технічної структури системи управління?
7. Як використовуються штучні нейронні мережі в системах управління?
8. Структура системи управління на базі нейронної мережі.
9. Методи реінжинірингу в автоматизації виробництва.
10. Методи дослідження операцій в системному аналізі.

### **Основна література**

1. Ладанюк А.П. Основы системного аналізу. Навчальний посібник. – Вінниця: Нова книга, 2004. – 176 с.
2. Стопакевич А.А. Сложные системы: анализ, синтез, управление. – Одесса: КРЕД, 2004. – 277с.

### **Додаткова література**

3. Денисов А. А., Колесников Д. А. Теория больших систем управления. Уч. пособие для вузов.– Л.: Энергоиздат, 1982, 288 с.
4. Дмитриев А. А., Мальцев П. А. Основы теории построения и контроля сложных систем.– Л.: Энергоатомиздат, 1988, 192 с.
5. Острейковский В. А. Теория систем. Уч. пособие для вузов.– М.: Высшая школа, 1997, 240 с.

