

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

В.К. Доля, О.В. Прасоленко

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни

### **«ОСНОВИ ТЕОРІЇ СИСТЕМ І УПРАВЛІННЯ»**

*(для студентів 3 курсу всіх форм навчання напрямку  
підготовки 6.070101 "Транспортні технології")*

Харків – ХНАМГ – 2009

Конспект лекцій з дисципліни «Основи теорії систем і управління» (для студентів 3 курсу всіх форм навчання напряму підготовки 6.070101 "Транспортні технології") / Авт.: Доля В.К., Прасоленко О.В.– Харків: ХНАМГ, 2009. – 86 с.

Автори: В. К. Доля  
О. В. Прасоленко

Рецензент: проф. Ю.О. Давідіч

Рекомендовано кафедрою транспортних систем і логістики,  
протокол № 5 від 25.09.2008 р.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>5</b>
<b>Тема 1. ІДЕНТИФІКАЦІЯ СИСТЕМ.....</b>	<b>6</b>
1.1. Предмет і область визначення теорії систем. Принципи загальної теорії систем (ЗТС).....	6
1.2. Системний підхід, аналіз і його етапи.....	8
1.3. Постулати ЗТС, теоретична і прикладна частини ЗТС.....	9
1.4. Система і її компоненти. Цілісність системи.....	11
1.5. Когерентність, адитивність і елементи системи.....	13
1.6. Види зв'язків між елементами системи.....	15
1.7. Структурні і функціональні схеми та стан системи. Структура систем.....	19
1.8. Стан системи.....	21
1.9. Властивості систем.....	23
1.10. Класифікація систем.....	27
<b>ТЕМА 2. ОПТИМІЗАЦІЯ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>36</b>
2.1. Композиція і декомпозиція причинно-наслідкових відносин між елементами системи.....	36
2.2. Умови статичної рівноваги системи в замкненому стані.....	40
2.3. Умови динамічної рівноваги системи в замкненому стані.....	41
2.4. Умови встановлення адекватності між системою і середовищем у розімкненому стані.....	43
<b>ТЕМА 3. УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ.....</b>	<b>48</b>
3.1. Етапи прийняття рішення.....	48
3.2. Шкали корисності для оцінки наслідків прийняття вирішення. Формування результату вирішення.....	49
3.3. Класичні критерії прийняття вирішення.....	50

3.4. Формування критеріїв управління.....	52
3.5. Етапи процесу управління.....	53
3.6 Завдання регулювання.....	54
<b>ТЕМА 4. ЗАКОНИ УПРАВЛІННЯ.....</b>	<b>56</b>
4.1. Умови повної керованості і спостережності.....	56
4.2. Показники якості управління. Інтегральні показники якості що використовують для оцінки процесу управління.....	59
4.3. Сутність оптимального управління. Надійність системи управління. Показники надійності.....	61
<b>ТЕМА 5. УПРАВЛІННЯ ПРИ ВИПАДКОВИХ ЗБУРЕННЯХ.....</b>	<b>64</b>
5.1. Єдність і протилежність проектування і управління. Часткове і системне управління.....	64
5.2. Методологія управління. Визначення евристичного, алгоритмічного і систематичного методів управління.....	67
<b>ТЕМА 6. ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ.....</b>	<b>72</b>
6.1. Сутність оптимального управління. Експлуатаційні характеристики Систем.....	72
6.2. Діагностика станів системи. Оптимальне управління експлуатаційними процесами .....	74
6.3. Оптимальне управління експлуатаційними процесами.....	81
<b>Список літератури.....</b>	<b>83</b>

## ВСТУП

Науково-технічна революція привела до виникнення таких понять, як великі й складні системи з специфічними для них проблемами. Для вирішення цих проблем створено безліч прийомів, методів і підходів, що поступово накопичувалися, розвивалися і узагальнювалися, складаючи рештою певну технологію подолання кількісних і якісних труднощів. З іншого боку, теоретична думка на різних рівнях абстракції відображала системність світу взагалі й системність людського пізнання і практики: на філософському рівні - діалектичний матеріалізм, на суспільному - системологія, загальна теорія систем і теорія організації, на природно - науковому – кібернетика. З розвитком обчислювальної техніки виникли інформатика й штучний інтелект.

На початку 80-х років стало очевидним, що всі теоретичні й прикладні дисципліни утворюють єдиний потік – “системний рух”. Системність стала не тільки теоретичною категорією, а й усвідомленим аспектом практичної діяльності. Оскільки більші й складні системи за необхідності стали предметом вивчення, керування і проектування, треба було узагальнити методи дослідження систем і впливу на них. Отже повинна була виникнути нова прикладна наука, яка поєднала б з абстрактними теоріями системності живу системну практику. Ця наука дістала назву “Основи теорії систем і управління”.

## Тема 1. ІДЕНТИФІКАЦІЯ СИСТЕМ

### 1.1. Предмет і область визначення теорії систем. Принципи загальної теорії систем

*Загальна теорія систем* (ЗТС) – науковий напрямок, пов'язаний з розробкою сукупності філософських, методологічних, конкретно-наукових і прикладних проблем аналізу й синтезу складних систем довільної природи. Часто загальну теорію систем називають «*системологією*». Останню визначають як *науку про системи*.

Найбільш важливою рисою ЗТС є її міждисциплінарний характер. Основою для цього є аналогічність (ізоморфізм) процесів, що протікають у системах різного типу, різної природи. Це дає можливість переносити знання з однієї галузі в іншу.

Кожне з трьох слів, що входять у назву цього наукового напрямку, має своє повне значення.

«*Загальна*» означає, що ЗТС має дедуктивний характер і поєднує інші теорії. Під дедуктивним розуміють, що більшість умовиводів даної теорії про елементи множин і відносини між ними виконують на основі знання загальних властивостей усіх множин.

«*Теорія*» – підклас висловлювань, що вважаються правдивими. Теорія є система узагальненого знання, пояснення тих чи інших сторін дійсності. Теорія є духовним, уявним відображенням і відтворенням реальної дійсності. Структуру теорії формують принципи, аксіоми, гіпотези, закони, судження, положення, поняття, категорії, факти.

Теорія складається з відносно твердого ядра і його захисного поясу. В ядро входять основні принципи. Захисний пояс теорії містить допоміжні гіпотези, що конкретизують ядро.

Під назвою «*теорія систем*» об'єднані математичні поняття і методи, що використовуються для вивчення широкого кола явищ і процесів.

«*Система*» – безліч взаємодіючих елементів (компонентів) і відносин між ними, які в цілому виконують певну функцію. Елемент системи – структурна одиниця, що має риси, які виражають головну якість системи. Відносини характеризують зв'язки між елементами (наприклад, менше, ніж..., включене в..., транзитивно..., тотожно і т.п.).

Визначень поняття «системи» може бути безліч, це залежить від прийнятого

рівня «абстрагування». Під **абстрагуванням** розуміють уявне відволікання від несуттєвих властивостей, зв'язків, відносин і виділення деяких сторін, що цікавлять дослідника. Воно, як правило, здійснюється у два етапи. На першому етапі визначають несуттєві властивості, зв'язки та ін. На другому – досліджуваний об'єкт заміняється іншим, більш простим, що являє собою спрощену модель об'єкта, але зберігаючий головне в простому.

Розрізняють такі рівні абстрагування:

- символічний, чи лінгвістичний;
- теоретико-множинний;
- абстрактно-алгебраїчний;
- топологічний;
- логіко-математичний;
- теоретико-інформаційний;
- динамічний;
- евристичний.

**Метою** ЗТС є вивчення законів, які діють у системах довільної природи на всіх рівнях організації.

У загальній теорії систем виділяють два напрямки.

У першому напрямку ЗТС розглядається як **метатеорія** різних системних концепцій, розробок спеціалізованих теорій систем. Даний напрямок аналізує розвиток ЗТС як деякої філософської концепції, що включає в себе такі поняття, як системні принципи, системний підхід, системний аналіз та ін.

Другий напрямок – теорія систем узагалі, що являє собою деякий математичний апарат, який описує закономірності формування і розвитку будь-яких систем. Теорію систем взагалі іменують **абстрактною теорією систем** (АТС). Іноді абстрактну теорію систем розглядають як молоді галузь кібернетики.

ЗТС орієнтована на застосування діалектичних принципів: цілісності, системності, релятивності, універсальності й розвитку.

Під **принципом** розуміють правило, яке виникає в результаті суб'єктивно осмисленого досвіду людей.

**Принцип цілісності.** Відповідно даного принципу система виявляє свою цілісність як конкретний об'єкт, в якого є граничні і якісні властивості.

**Принцип системності** орієнтований на цілісне представлення досліджуваних об'єктів.

**Принцип релятивності** системи вказує, що будь-яку безліч предметів можна розглядати як систему і як несистему.

**Принцип універсальності** системи вказує, що завжди можна знайти такий

аспект, стосовно якого щось можна описувати як систему.

**Принцип розвитку** вказує на безперервне співвіднесення і узгодження зовнішньої і поточної внутрішньої детермінант системи в період її існування.

## 1.2. Системний підхід, аналіз і його етапи

**Системний підхід** – поняття, що підкреслює значення комплексності, широти охоплення і чіткої організації в дослідженні, проектуванні й плануванні. Системний підхід спирається на відомий діалектичний закон взаємозв'язку і взаємозумовленості явищ у світі й суспільстві. Він вимагає розглядати досліджувані явища й об'єкти не тільки як самостійну систему, але і як підсистему деякої великої системи. Найбільш повно сутність системного підходу сформулював В.Г. Афанасьєв, який визначив ряд взаємозалежних аспектів, які в сукупності і єдності складають системний підхід. Такими аспектами є:

- системно-елементний, що відповідає на запитання, з чого (яких компонентів) утворена система;
- системно-структурний, який розкриває внутрішню організацію системи, спосіб взаємодії утворюючих її компонентів;
- системно-функціональний показує, які функції виконує система і компоненти, що її утворюють;
- системно-комунікаційний розкриває взаємозв'язок даної системи з іншими як по горизонталі, так і по вертикалі;
- системно-інтегративний, що показує механізми, фактори збереження, удосконалення і розвитку системи;
- системно-історичний (еволюційний) відповідає на запитання як, яким чином виникла система, які етапи проходила в своєму розвитку, які її історичні перспективи.

**Системний аналіз** – процедура вирішення взаємозалежних одна з іншою проблем.

**Аналіз** у широкому значенні – це метод пізнання за допомогою розчленування чи розкладання предметів дослідження на складові частини. Основна мета системного аналізу – забезпечення цілісного, всебічного підходу до вирішення складної проблеми. В його основі лежить поняття системи. На базі цього поняття виконують урахування всіх обставин. При цьому використовують кількісне порівняння всіх альтернатив для того, щоб уможливити свідомий вибір найкращого в даній ситуації рішення. Оцінку альтернатив виконують за різними критеріями, наприклад, за критерієм вимірності, ефективності, надійності та ін. Головну роль



у системному аналізі відіграють теоретичні побудови, засновані на таких загальних поняттях, як «зв'язок», «відношення», «властивість», «процес» та ін.

*Системний аналіз* можна розглядати як наукову дисципліну, що на основі системно організованих, структурно взаємозалежних і функціонально взаємодіючих евристичних процедур, методологічних засобів, математичного апарата, програмного забезпечення та обчислювальних можливостей комп'ютерних систем і мереж забезпечує в умовах концептуальної невизначеності отримання і накопичення інформації про досліджуваний предмет. Така інформація потрібна для наступного формування знань про цей предмет як єдиного, цілісного об'єкта з позицій побудови мети дослідження і ухвалення раціонального рішення в умовах різнорідних багатofакторних ризиків.

#### ***Основні етапи системного аналізу:***

- визначення цілей системи і встановлення їхньої ієрархії до початку процесу ухвалення рішення;
  - структуризація: виділення об'єкта дослідження і середовища його існування;
  - розробка математичних моделей, що відбивають зміст цілей;
  - визначення обмежень і вимог, що накладаються на систему середовищем;
  - розробка різних (альтернативних) способів досягнення цілей;
  - оцінка варіантів рішень, що базується на всьому прийнятому комплексі критеріїв;
- вибір кращого варіанта.

### **1.3. Постулати ЗТС, теоретична і прикладна частина ЗТС**

Загальна теорія систем спирається на три постулати.

Відповідно до ***першого постулата*** функціонування систем будь-якої природи може бути описане на основі розгляду формальних структурно-функціональних зв'язків між окремими елементами систем.

***Другий постулат*** показує, що організація системи може бути визначена на основі спостережень, проведених ззовні за допомогою фіксованих станів тільки тих елементів системи, що безпосередньо взаємодіють з її оточенням.

***Третій постулат*** показує, що організація системи цілком визначає її функціонування і характер взаємодії з навколишнім середовищем.

Постулати ЗТС дають можливість вирішувати *два завдання*:

- 1) визначення організації системи, виходячи з характеристик взаємодії із зовнішнім середовищем;

2) визначення характеристик взаємодії, виходячи з організації системи.

*Теоретичною частиною* загальної теорії систем є кібернетика, теорія інформації, теорія ігор, теорія прийняття рішень, топологія, факторний аналіз, теорія множин, теорія осередків, теорія графів, теорія мереж, теорія автоматів, теорія масового обслуговування та ін.

*Прикладною частиною* ЗТС є системотехніка, дослідження операцій, інженерна психологія, ергономіка.

Через те, що системні дослідження мають загальний, міждисциплінарний характер, тобто стосуються утворення, розвитку, функціонуванню, синтезу будь-яких систем, цілком правомірним є таке світоглядне запитання: чи не замінюють вони філософію, чи не є вони новою загальною методологією науки?

Деякі теоретики системного методу відповідають на це запитання позитивно, деякі негативно. Для внесення ясності в цю проблему розглянемо три її аспекти.

*По-перше*, прихильники позитивної відповіді занадто вузько розуміють функції філософського знання, зводячи їх до однієї – бути методологією наукового дослідження.

*По-друге*, не можна теоріям ставити за провину ті світоглядні характеристики, що даються їхніми творцями.

*По-третє*, слід рішуче відмовитися від метафізичної альтернативи: діалектика чи системний підхід. У процесі системних досліджень виникає багато філософських проблем, але це не дає підстави ототожнювати системний підхід з філософією. Системний метод, подібно математичним методам відноситься до загальнонаукових методів дослідження, що існує у взаємозв'язку, з одного боку, з конкретно науковими, з іншого – із загальними (філософськими) методами. Тобто, багато понять теорії систем – загальнонаукові поняття.

Таким чином, системний підхід, з одного боку, дозволяє застосовувати ряд загальнофілософських положень для вирішення приватних завдань, а з іншого – збагачує саму філософію за рахунок розвитку конкретних наук.

Загальна теорія систем зародилася в 30-х роках ХХ ст. і в 50-ті роки сформувалася в самостійний науковий напрям. Ще в 1945 р. при організації сектора філософських питань природознавства в Інституті філософії Академії наук СРСР академік С.И. Вавілов сформулював мету і завдання роботи сектора, серед яких головне місце займали проблеми цілісності й системності.

Засновниками ЗТС вважають біолога Л. Бергаланфі, фахівців із математичних проблем в галузі біології і психології Р. Жерара, А. Рапопорта, А. Хола, Р. Фейджина, Л. Хартлі, економіста К. Боулдінга, фахівця з лінгвістики М. Месаро-

вича, бельгійського фізика І. Прігожина. Великий внесок у розробку ЗТС внесли радянські вчені А.І. Ракітов, В. М. Глушков, В.Г. Афанас'єв, І.В. Блауберг, Е.Г. Юдін, П.К. Анохін, Н.П. Бусленко, А.И. Берг, В.Н. Бурков, Ю.М. Горянський, Л.А. Колісників, І.Ф. Зразків, В.Н. Садовський, В.В. Павлов, Г.П. Мельников, Ю.А. Шредер та інші.

У 1954 р. у США було організовано «Суспільство досліджень в області загальної теорії систем» (Society for General Systems Research). З 1956 р. це товариство видає щорічник «General Systems». У 1959 р. при Кейсовському технологічному інституті (США) був створений «Центр системних досліджень». У 1963 р. корпорація «Интернейшенал бізнес машинз корпорейшен» організувала Інститут системних досліджень. З 1969 р. в СРСР видається щорічник «Системні дослідження». У ці роки був створений теоретичний базис математичного і методологічного інструментарію формалізації і автоматизації на базі ЕОМ процедур вирішення реальних організаційних і технічних системних проблем у різних сферах практичної діяльності. У 70-х роках ХХ ст. сформувалася методологічна криза, що проявилася у невідповідності існуючої методології глобальній проблематиці. Це привело до розробки багаторівневої, ієрархічної структури методології системного аналізу глобальної проблематики.

У теперішній час методологічні й інструментальні засоби системології дозволяють досліджувати властивості складних об'єктів довільної природи, а також причини їхнього виникнення, динаміку адаптації і розвитку. Завдяки цьому можна більш ефективно здійснювати керування будь-якими складними об'єктами для забезпечення їхньої стійкості й безпеки, прогнозувати еволюції систем, розробляти й конструювати системи будь-якої природи.

Системологія, яка інтерпретована в термінах конкретної науки, може виконувати методологічні функції, використовуватись як засіб «діалектичної обробки» створюваного конкретною наукою знання, тобто як засіб «організації» ноосфери.

#### **1.4. Система і її компоненти. Цілісність системи**

Поняття «*система*», як і всяке інше поняття, – ідеальний об'єкт, що відбиває у свідомості деяку групу (клас) матеріальних об'єктів (явищ), які виділяють у процесі пізнання з матеріального світу. Поняття – це думка, що відтворює істотні і необхідні ознаки предмета чи явища. Усяке поняття як сукупність істотних ознак об'єкта, об'єднаних в одній думці, є результат логічної *абстракції* (лат. *abstrahere* – відволікати) від усіх об'єктів даного роду. Ми відволікаємо їхні істотні ознаки і потім поєднуємо ці ознаки в одну цільну думку чи в одну ідею про даний об'єкт.

Існує безліч визначень поняття системи. Найбільш поширені з них:

система – цілісна взаємозалежна безліч об'єктів;

система – цілісна безліч об'єктів (елементів), пов'язаних між собою взаємними відносинами;

система – порядок (план, класифікація), згідно з яким розташовується група понять для утворення єдиного стрункого цілого;

система – сукупність взаємозалежних, певним чином організованих і взаємодіючих елементів;

система – організована безліч структурних елементів, взаємозв'язаних і виконуючих певні функції;

система – комплекс вибірково залучених компонентів, у яких взаємодія і взаємини здобувають характер взаємосприяння компонентів для одержання фіксованого корисного результату;

система – сукупність взаємозалежних елементів, відособлена від середовища і взаємодіюча з нею як ціле.

Якщо розглянути всі визначення системи, то можна виділити дві тенденції: одна з них спрямована на отримання формулювання поняття системи в найбільш загальному вигляді, що відбиває структуру складних понять, їхню членованість, абстрактність; друга спрямована на підкреслення в понятті «система» практичної спрямованості об'єктів. У другій тенденції фігурують мета, продукція, результат.

Перша тенденція використовує вищий рівень абстрагування. Тому у визначення системи включені й різного роду *конгломерати*, суміші, властивості яких адитивні й зводяться до простої суми властивостей, його складових. Так кілька молекул газу – теж система, оскільки наявність хоча б двох молекул, що ударяються, вже означає їхню механічну взаємодію. Але такі системи ще не мають *інтегративних*, цілісних властивостей. Головна ознака конгломерату полягає в тому, що при включенні до нього чи виключенні з нього компонентів ні сам конгломерат, ні його компоненти не зазнають скільки-небудь помітних якісних змін. Конгломерат тільки збільшується чи зменшується в розмірах. Кожний з компонентів конгломерату автономний, його зміна залежить лише від нього самого, тому що зв'язки між компонентами мають зовнішній, вкрай хиткий характер. Яскравим прикладом конгломератів є транспортні потоки малої щільності. Вилучення з їхнього складу чи включення в їхній склад частини транспортних засобів не приводить до помітних якісних змін потоку. Конгломерати часто називають *сумативними системами*.

Друга тенденція у визначенні поняття системи показує її доцільність, прагнення до досягнення певної мети. Наявність мети виступає в ролі системоутво-

рюючого фактора, що поєднує компоненти в єдине ціле, перетворює конгломерат у цілісну систему. Головною відмінністю цілісної системи від сумативної є наявність у цілісній системі інтегративних властивостей. Системи, де в якості системоутворюючого фактора виступає мета, називають **цілеспрямованими**. Визначення таких систем характерно для нижчого рівня абстрагування. Конгломерати і цілеспрямовані системи – крайні точки системності об'єктивного світу.

На проміжних рівнях абстрагування визначення системи відображує ступінь її цілісності. Цілісна система не зводиться до механічної суми частин, що її утворюють. Так, звертаючись до молекул газу, можна сказати, що при наявності достатньої кількості молекул для повного прояву статистичних закономірностей, система молекул стає термодинамічно цілісною системою. Вона чітко виявляє нові інтегративні властивості (температуру, тиск), яких окремі молекули не мають. Аналогічне явище спостерігається у транспортному потоці. При збільшенні щільності потоку залежність руху одного автомобіля від іншого збільшується, рух автомобілів стає зв'язаним. Перехідний інтервал за часом між автомобілями від вільного до зв'язаного руху складає 6 – 9 с. У зв'язаному стані транспортний потік здобуває якісно нові цілісні властивості. Такі властивості називають **емерджентними** (породженими). Їх немає в окремих елементів системи. Вони виникають у результаті взаємодії цих елементів. Гарний приклад прояву породженої властивості навів М. Арбіб. Нехай є деякий цифровий автомат S, що перетворить будь-яке ціле число на його вході в число, на одиницю більше вхідного. Якщо з'єднати два таких автомати послідовно в кільце, то в новій системі виявиться нова властивість: вона генерує зростаючі послідовності на виходах A і B (рис. 1). Одна з цих послідовностей складається тільки з парних, інша – тільки з непарних чисел.

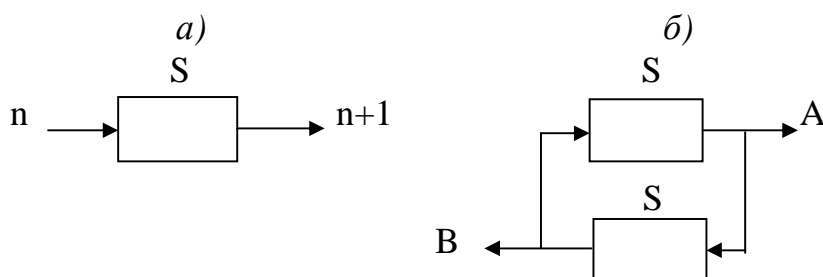


Рис. 1 – Ілюстрація властивості емерджентності:  
 а) вихідний цифровий автомат; б) з'єднання двох автоматів.

Слід зазначити, що нічого містичного в породженні нових властивостей немає. Нові властивості виникають завдяки конкретним зв'язкам між конкретними елементами. Інші зв'язки дадуть інші властивості. Наприклад, паралельне з'єднання тих же автоматів нічого не змінює в арифметичному відношенні, але збільшує

надійність обчислень, якщо на вихід надходить сигнал тільки від справного автомата.

Властивість емерджентності є проявом внутрішньої цілісності системи, чи, як ще кажуть, *системоутворюючим фактором*.

Відзначаючи відміну цілісної системи від системи сумативної, не слід мати на увазі, що абсолютної границі між ними не існує. У процесі еволюції матеріального світу в результаті дії інтегративних сил (скажімо, сил притягання у фізичних і хімічних процесах) адитивні системи здобувають характер цілісних систем, і, навпаки, унаслідок дії сил дезорганізації, наприклад, зростання ентропії, цілісні системи нерідко розпадаються і перетворюються в системи сумативні. Перетворення сумативних систем у цілісні може відбуватись різним чином: способом зміцнення зв'язків вже існуючих компонентів; за допомогою розвитку взаємодії компонентів, раніше не взаємодіючих; способом утворення нових компонентів та їхніх зв'язків чи перегрупування наявних та ін. Перетворення цілісних систем у сумативні теж може відбуватись по-різному: за допомогою ослаблення чи руйнування обмежених зв'язків компонентів; у результаті вилучення чи втрати компонентів та ін. Прикладом також може бути транспортний потік. Так, зменшення щільності потоку веде до зменшення його зв'язності й перетворення у вільний потік, тобто конгломерат.

### 1.5. Когерентність, адитивність і елементи системи

Якщо кожна частина системи зв'язана з іншою частиною таким чином, що зміна в одній частині викликає зміну у всіх інших частинах і у всій системі, то вважають, що система поводить ся *когерентно* чи як *ціле*. Іншу крайність складає безліч частин, зовсім не зв'язаних між собою, так що зміна в кожній частині залежить винятково від цієї частини. Така поведінка називається незалежністю, або *фізичною адитивністю*.

Цілісність (чи когерентність) і незалежність (чи адитивність) – це не дві окремі властивості, а крайні ступені тієї самої властивості.

Формально, в теоретико-множинному смислі, цілісність системи може бути оцінена за допомогою міри системності  $M_s$ , запропонованої Г.П. Мельником:

$$M_s = \frac{|F_b \cap F_T|}{|F_b \cup F_T|},$$

де  $F_T$  - множина необхідних функціональних станів;  $F_b$  - множина можливих функціональних станів;  $\cap$  - операція пересічення множин;  $\cup$  - операція об'єднання множин.

Поняття «система» відрізняється від поняття «комплекс». **Комплекс** означає в перекладі з латинської «зв'язок», «сполучення». У світі все взаємозалежно, але одного взаємозв'язку для розуміння системи недостатньо, тут потрібно виділити конкретну специфіку взаємодії елементів сукупності. Комплексність тільки грань системності.

Неодмінними приналежностями системи є елементи, компоненти, частини, саме те, з чого безпосередньо утворене ціле і без чого воно неможливе.

Звичайно під **частиною** системи розуміють щось просторово віддільне від системи. Наприклад, дерево можна розчленувати на безліч окремих шматків, кожний з яких називають частиною. Таке уявлення про частину системи має механістичний характер. Більш обґрунтованим є представлення частини системи у вигляді її компонента.

**Компоненти** – це взаємодіючі структури цілісної системи, що підкоряються тим же законам, що і вся система. Звичайно як компоненти виступають підсистеми. **Підсистема** – це система в системі більш високого порядку (**надсистемі**).

Підсистеми утворені компонентами нижчого порядку стосовно системи в цілому. Усякий розподіл цілого на частини, усякий розподіл системи на підсистеми є відносним, деякою мірою умовним. Наприклад, гальмову систему автомобіля можна віднести або до ходової частини, або до підсистеми керування. Іншими словами, границі між підсистемами умовні, відносні. Це стосується і границь між самою системою і навколишнім середовищем.

**Елемент** (елементарний) означає кінцевий, неподільний, останній. Елемент – це поріг членування в рамках даної якості системи й елементарний його носій. Зрозуміло, елемент неподільний не взагалі, а тільки в рамках даної якості. Членування елемента виводить дослідника в якісно іншу систему.

## 1.6. Види зв'язків між елементами системи

Відносини між елементами, компонентами, підсистемами і системами реалізуються через **зв'язки** між ними. Зв'язки можуть бути енергетичними, речовинними, інформаційними, внутрішніми і зовнішніми, прямими і зворотними.

Елементи, компоненти, підсистеми і системи в цілому графічно позначають квадратами, ромбами, прямокутниками, окружностями та ін. Зв'язки – суцільними, пунктирними лініями і стрілками (рис. 2). Кожен елемент, компонент та ін.

мають вхід і вихід.

**Вхід** – місце прикладання зовнішньої дії. Зовнішню дію називають стимулом, подразником, вхідним сигналом.

**Вихід** – місце зняття вихідної характеристики. Вихідну характеристику називають вихідним сигналом, реакцією системи на зовнішню дію.

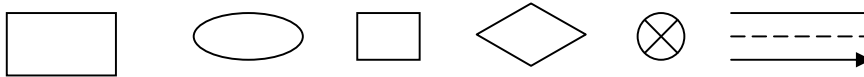


Рис. 2 – Позначення елементів і зв'язків

Часто вихідну характеристику визначають як зміну вихідного сигналу в часі.

Через входи із зовнішнього середовища в певні моменти часу в систему надходить речовина, енергія чи інформація; в інші моменти часу результати процесів їхнього перетворення надходять у зовнішнє середовище через виходи.

Через співвідношення вхідних і вихідних величин можливі різні схеми їхньої взаємодії. Найбільш типовими є такі чотири схеми (рис. 3):

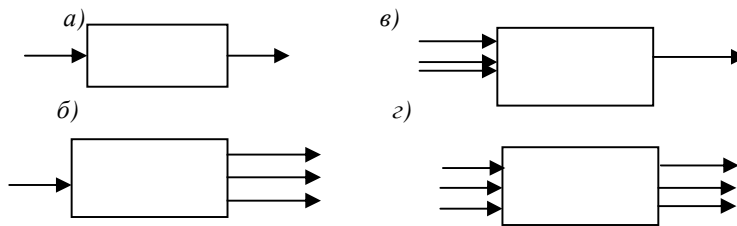


Рис. 3 – Схеми взаємодії:

а) одномірно-одномірна; б) одномірно-багатомірна;  
в) багатомірно-одномірна; г) багатомірно-багатомірна.

1) одномірно-одномірна (однофункціональна) – один вхідний сигнал і одна вихідна характеристика;

2) одномірно-багатомірна – один вхідний сигнал і декілька вихідних характеристик;

3) багатомірно-одномірна – декілька вхідних сигналів і одна вихідна характеристика;

4) багатомірно-багатомірна – декілька вхідних сигналів і декілька вихідних характеристик.

Елементи і компоненти системи, їхні входи і виходи по різному зв'язані між собою. Існують такі види зв'язків – незамкнені, замкнені й складні:



1. Основні незамкнені зв'язки: прямий послідовний (простий) зв'язок (a); паралельний розподільчий зв'язок (b); паралельний з'єднуючий зв'язок (c); послідовний зв'язок між системами A, B, C, D (d); непрямий зв'язок між системами A і C, A і D, B і D (d); паралельний зв'язок, що розгалужується (e) (рис. 4).

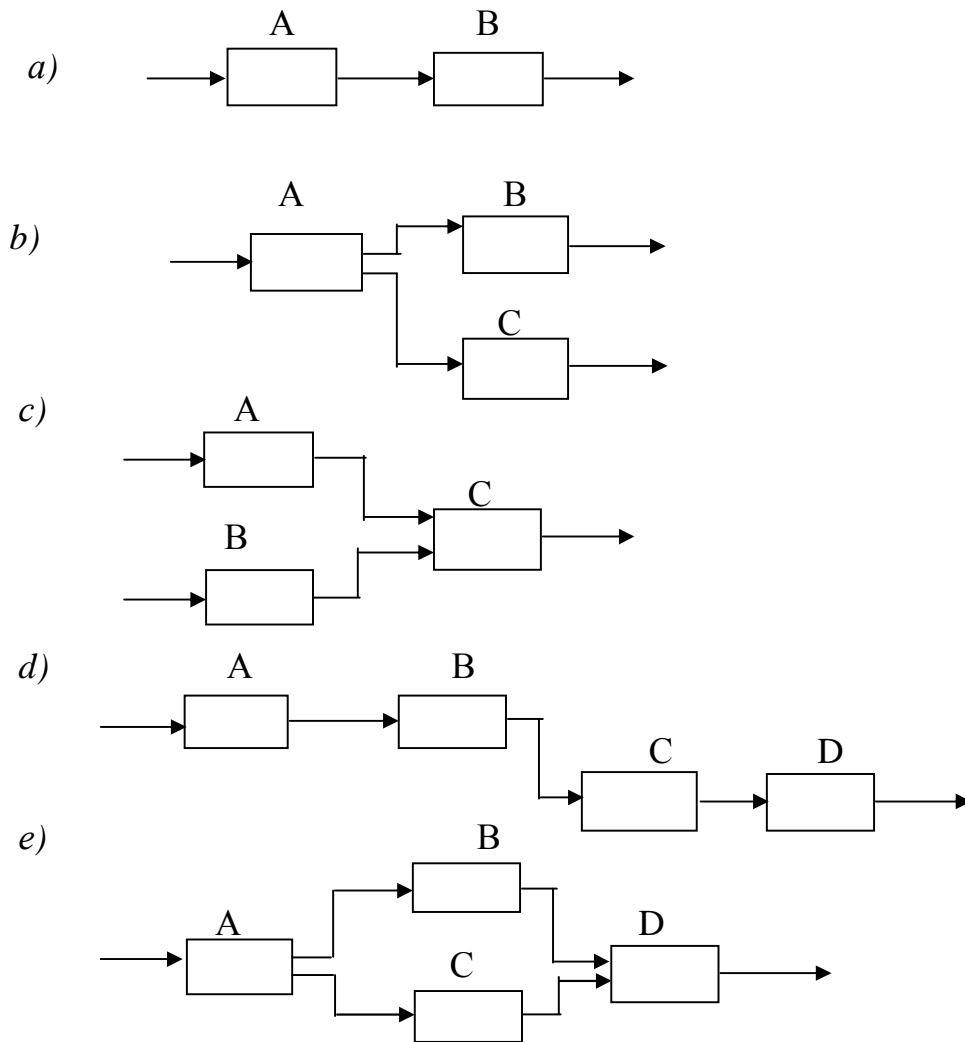


Рис. 4 – Види незамкнених зв'язків у системах

Зв'язки типу c) і e) характеризують випадок, коли з'єднуються виходи багатьох однотипних елементів. Такого роду з'єднання називають масовими, а системи, що містять такі з'єднання, – **масовими системами**.

2. Основні замкнені зв'язки формуються за допомогою зворотного зв'язку. **Зворотний зв'язок** – це зв'язок між виходом і входом того самого елемента чи системи. Він може здійснюватись безпосередньо або через інші елементи системи. Зворотний зв'язок, що зменшує дію вхідного впливу на вихідну величину, називають негативним, а той, що збільшує цей вплив, – позитивним. Негативний зво-

ротний зв'язок сприяє відновленню рівноваги в системі, порушеної зовнішньою дією, а позитивний – підсилює відхилення від рівноважного стану відносно до його величини в системі без такого зворотного зв'язку.

До складу замкнених зв'язків включають: власний зворотний зв'язок (*a*); прямий зворотний зв'язок (*b*); непрямий зворотний зв'язок (*c, d*) (рис. 5).

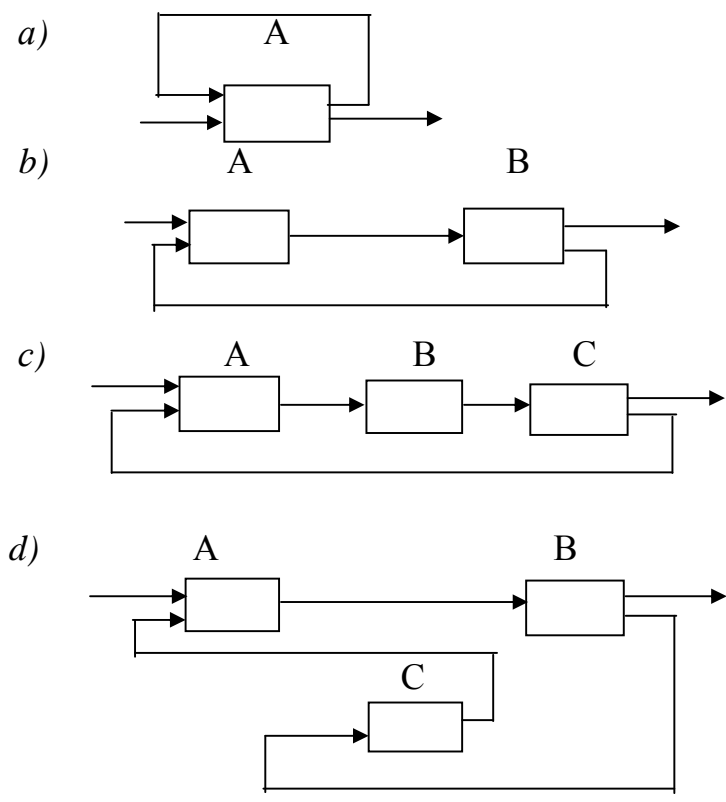


Рис. 5 – Основні види замкнених зв'язків у системах

3. Складні зв'язки. У складних системах виникає безліч комбінацій зв'язків між окремими елементами і підсистемами. Найчастіше зустрічаються: зворотний паралельний розподільчий зв'язок (*a*); зворотний паралельний сполучний зв'язок (*b*); послідовний паралельний зв'язок (*c*) (рис. 6).

Аналіз елементів, компонентів і зв'язків між ними дозволяє встановити, з чого складається система. Але при дослідженні системи важливо розкрити, як влаштована, організована система, як і в ім'я чого вона діє. Тут перед дослідником постає питання про структуру і функції системи.

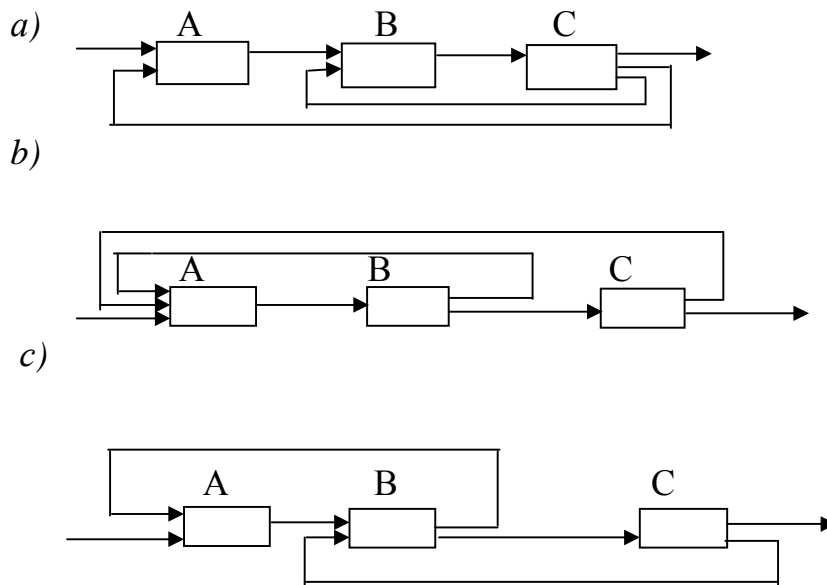


Рис. 6 – Види складних зв'язків у системах

### 1.7. Структурні й функціональні схеми й стан системи. Структура систем

**Структура** – внутрішня організація системи, що являє собою специфічний спосіб взаємозв'язку, взаємодії утворюючих його компонентів. Структура – це впорядкованість, організованість системи. Поняття структури вживається і в іншому, більш широкому смислі як сукупність необхідних і достатніх для досягнення мети відносин між елементами.

Поняття «**функція**» вживається в самих різних значеннях. Вона може означати здатність до діяльності і саму діяльність. Такий підхід до визначення функції розглядає її як спосіб прояву активності, життєдіяльності системи і її компонентів. Часто функцію визначають як реакцію системи на зовнішній вплив. Але такий підхід справедливий тільки для однофункціональних систем.

У широкому значенні функція – це форма, спосіб прояву активності, життєдіяльності системи та її компонентів. Функції характерні й системі, й її компонентам, причому функції системи є інтегративний результат утворюючих її компонентів.

Поняття функції близьке до поняття мети, вони тісно зв'язані одне з одним. **Мета** – це майбутній стан системи, стан, до якого вона прагне. Звичайно мета даної системи ставиться системою більш високого порядку (надсистемою), до якої входить дана система. З позицій системи більш високого порядку мета даної системи є її функція. Тоді **функція** – це **призначення** системи чи її компонентів, що реалізується через спрямоване перевтілення вхідних сигналів у вихідні характеристики. Функція – це частка участі системи у функціонуванні надсистеми. Надсис-

тема впливає на систему таким чином, що властивості системи як функціонального об'єкта змінюються в напрямку посилення здатності сприяти ефективному функціонуванню надсистеми.

Формально функція представляється залежністю вихідної характеристики від вхідних сигналів. Для графічного подання систем використовують структурні й функціональні схеми.

**Структурна схема** – схематичне зображення взаємодії між елементами, компонентами, підсистемами і зовнішнім середовищем. У структурній схемі вказуються всі елементи системи, всі зв'язки між елементами усередині системи і зв'язки певних елементів з навколишнім середовищем. Часто структурні схеми подають у вигляді графів. Граф складається з позначень елементів, що називаються вершинами, і позначень зв'язків між ними, що називаються ребрами (іноді дугами). Графи можуть зображувати будь-які структури, якщо не накладати обмежень на пересіченість ребер. Деякі типи структур мають особливості, важливі для практики, вони виділені з інших і отримали спеціальні назви. Так, в організаційних системах часто зустрічаються *лінійні*, *деревоподібні*, *матричні*, *мережні* структури і структури зі *зворотними зв'язками* (рис. 7).

**Функціональна (феноменологічна) схема** – графічне представлення функцій системи чи її компонентів без відображення їхнього внутрішнього структурування. Компоненти функціональної схеми не вимагають того, щоб бути цілком подібними компонентам прототипу, тому що метою створення такої схеми є тільки опис функцій прототипу. Кожний з компонентів системи, власне кажучи, є «чорною скринькою». Поняття *чорної скриньки* образно підкреслює повну відсутність відомостей про її внутрішню будову. Чорна скринька – основа макропідходу до аналізу систем, тобто таких методів вивчення системи, що ґрунтуються на властивостях співвідношення вхід-вихід.

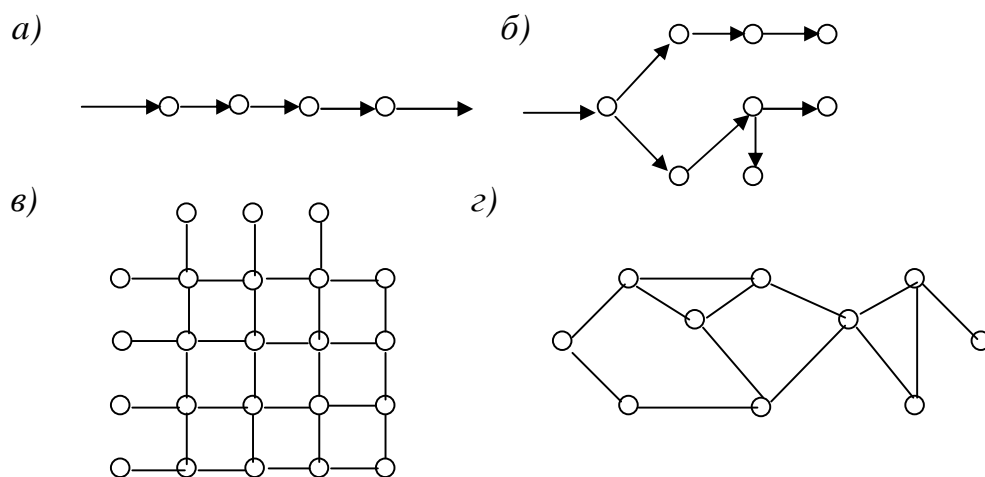


Рис. 7 – Графи різних структур:  
 а) лінійна структура; б) деревоподібна структура;  
 в) матрична структура; г) мережна структура.

## 1.8. Стан системи

**Стан системи** – це якась (внутрішня) характеристика системи, значення якої в даний момент часу визначає поточне значення вихідної величини.

Представлення про стан системи пов'язується із широким колом показників і характеристик, які визначають її функціонування і реакції на різні зовнішні впливи. Стан системи – точно визначена умова чи властивість, яка може бути пізнана, чи повторена знову.

**Стан** системи в момент часу  $t_0$  – є такий набір відомостей про поведінку системи, якого разом з деяким можливим вхідним впливом, заданим при  $t_0 \leq t \leq t_j$ , досить для однозначного визначення вихідного сигналу для  $t_0 \leq t \leq t_j$  при кожному  $t_j \geq t_0$ . Звичайно при канонічному представленні системи її стан визначається як найменший набір чисел, який необхідно задати в даний момент часу, щоб можна було в рамках математичного опису системи передбачити її поведінку в будь-який майбутній момент часу. Наприклад, для опису стану виробничого підприємства як мінімум необхідно задати числа, що оцінюють наявні потужності  $q_1$ , трудові ресурси  $q_2$ , запаси матеріалів  $q_3$  та ін. Дані числа називають координатами стану чи зображуючими точками елемента (системи) в  $k$ -мірному просторі станів. Такий простір називають **зінерпростором**.

При зміні стану системи змінюються її координати, вони стають змінними величинами і представляються у вигляді  $q_1(t_1), q_2(t_2), \dots, q_n(t_n)$ ... Ці величини прийнято називати характеристиками станів системи.

Залежно від мети дослідження до уваги беруть тільки вагомі характеристики. При зміні мети досліджень склад вагомих характеристик може змінюватись. Чим ретельніше будуть відібрані вагомі характеристики, тим точніше можливий опис змін стану системи і тим ефективніше вплив на неї.

Агрегація координат стану формує вектор стану  $Q$ .

Для практичного аналізу динаміки станів системи важливі три типи станів: нульовий стан, стан, що установився, і стан рівноваги.

**Нульовим станом** називають деякий стан  $\theta$ , для якого

$$0 = \psi(\theta, 0, t) \text{ при всіх } t_0 \leq t < \infty.$$

Іншими словами, нульовий стан має таку властивість: якщо система знаходиться в нульовому стані

$$Q(t_0) = \theta$$

і вхідний вплив є нульовим

$$X(t) = 0, \quad t_0 \leq t < \infty,$$

тоді вихідний сигнал системи також виявляється нульовим

$$Y(t) = 0, \quad t_0 \leq t < \infty,$$

де  $X, Y$  - вектори входів і виходів відповідно.

Відмітимо, що нульовий стан необов'язково єдиний.

**Стан, що встановився**, якщо він існує, є такий єдиний стан  $\gamma$ , в який система приходиться при нульовому вхідному впливі незалежно від початкового стану.

**Стан рівноваги** є деякий стан  $\eta$ , в якому система залишається при нульовому вхідному впливі

$$\Phi(\eta, 0, t) = 0 \text{ при будь-яких } t_0 \leq t < \infty.$$

Зміна стану реального об'єкта неминуче пов'язана з переносом і перевтіленням речовини, енергії чи інформації, і не може відбуватись миттєво. Процес переходу з одного стану в інший називають **перехідним процесом**, а сам перехід – **трансформацією** (перевтіленням) стану.

У кібернетиці деякий початковий стан, на який чиниться вплив з метою трансформації, називають **операндом** (операнд – те, що випробує дію). Діючий фактор називають **оператором**. Новий стан системи, що виникає під дією оператора, називають **образом** (образ – те, у що перетворюється операнд). Наприклад, нагрівається вода, перетворюється в пару. Вода – операнд, тепло – оператор, новий стан – пар. Ця зміна описується формулою : вода  $\rightarrow$  пар і називається переходом. Стрілкою вказується напрямок переходу.

Трансформація станів може бути подана такими способами:

- а) словесний опис;
- б) загальна форма;
- в) матрична форма;
- г) кінематичний графік;
- д) математичні формули;
- е) логічні формули.

Прикладами *словесного опису* можуть бути технологічні карти виконання робіт. Наприклад, виконання робіт при влаштуванні шару дорожнього одягу з ґрунту, укріпленого бітумом у межах однієї захватки включає такі операції: транспортування ґрунту, розрівнювання ґрунту, транспортування води, роздрібнення і зволоження ґрунту, транспортування бітуму, змішування ґрунту з бітумом, ущільнення ґрунту, обробленого бітумом. На наступній захватці всі операції повторюються.

## 1.9. Властивості систем

**Властивість** – здатність системи виявляти ті чи інші сторони в процесі взаємозв'язку і взаємодії. Ця здатність обумовлюється внутрішньою природою системи, її будовою, структурою. Властивість можна розглядати як окремий випадок відношення. У відношенні бере участь не менше двох об'єктів, а властивістю ми називаємо деякий атрибут одного об'єкта. Іншими словами, властивість – це одніє згорнуте відношення.

Розрізняють три типи властивостей:

- 1) властивості, обумовлені структурою і функціями системи;
- 2) властивості, що формують здатність до самозбереження системи;
- 3) властивості, що характеризують тактику і стратегію поведінки системи при досягненні мети. Такі властивості часто називають функціональними чи цільовими.

До першої групи властивостей відносять **властивості, породжені відносинами в предметах**, уже представлених як системи. Ці властивості часто називають **системоутворюючими**. У їхнє число включають: *структурну і функціональну складність, організованість, розчленованість, взаємну автономність елементів, варіативність, елементарність, іманентність, надійність, однорідність, завершеність, мінімальність та ін.*

Головними в сполученні цих властивостей є **структурна і функціональна складності**.

Існує кілька концепцій визначення складності:

- логічна концепція, заснована на аналізі властивостей предикатів, що характеризують систему;
- алгоритмічна концепція, що визначає складність як довжину алгоритму відтворення системи;
- обчислювальна концепція, що прив'язує алгоритмічну складність до засобів обчислень;

- статистична концепція, що характеризує складність через міру розрізнення розподілів імовірностей;
- теоретико-множинна концепція, що ототожнює складність системи з числом її елементів;
- теоретико-інформаційна концепція, що пов'язує складність системи з її ентропією.

У рамках теоретико-інформаційної концепції в якості міри *складності* У.Р. Ешбі запропонував використовувати розмаїття, що кількісно оцінюється числом можливих станів системи « $n$ ». Надалі Л. Хартлі було показано, що для оцінки складності зручно використовувати логарифмічну міру

$$H_m = \log n,$$

де  $H_m$  - міра складності (максимальна ентропія системи).

Оцінка складності за числом станів не показує, в якому з можливих станів система знаходиться і в якій вона перейде в наступний момент часу.

Коли покласти, що  $P_i$  є імовірність того, що система знаходиться в  $i$ -тому стані, тоді для оцінки стану системи можна використовувати формулу К. Шеннона:

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \log P_i,$$

де  $H$  – поточна невизначеність системи.

Для закритої системи її організованість (визначеність) чи абсолютна організація може бути оцінена за формулою

$$Q = H_m - H,$$

де  $Q$  – абсолютна організація системи.

Якщо ліву й праву частини даного рівняння розділити на  $H_m$ , ми одержимо оцінку відносної організації системи у формі Г. Ферстера:

$$R = 1 - \frac{H}{H_m},$$

де  $R = \frac{Q}{H_m}$ .



**Розчленованість** системи характеризує її здатність поділятися на складові.

Властивість **взаємної автономності елементів** системи проявляється в тому, що кожному її елементу притаманні властивості системи в цілому.

**Варіативність** – це прояв здатності змінюватись, проходячи ряд станів, перетворюватись в іншу систему.

**Елементарність** оцінюється відношенням структури системи до її елементів. Кожен елемент елементарної системи не є системою з такою ж структурою як і система.

Властивістю, яка визначається у тому ж відношенні, що й елементарність, можна вважати **іманентність**. Дана властивість проявляється в тому, що системоутворююче відношення охоплює тільки елементи даної системи і не поширюється поза нею.

**Надійність** – здатність зберігати свою системоутворюючу властивість при елімінації будь-якої кількості елементів, крім одного.

Властивість **однорідності** може відноситись і до елементів і до самої структури системи. У першому випадку, коли системи складаються з однорідних елементів, говорять про елементну (чи субстрактну) гомогенність. У випадку однорідної структури система може бути структурно (чи функціонально) гомогенною. Однорідність, звичайно, розуміють в тому самому плані, в якому утворена система, стосовно системоутворюючої властивості.

**Завершеність** системи виявляється в тому, що вона не допускає приєднання нових елементів без руйнування цієї системи.

На відміну від завершеності **мінімальність** указує не на можливість приєднання, а на можливість вилучення елементів. Якщо структура системи така, що система руйнується при вилученні хоча б одного елемента, то система мінімальна.

**Властивості, що формують здатність системи до самозбереження, часто називають зберігаючими.** У їхній структурі виділяють:

а) здатність зберігати стаціонарний нерівновагий стан незалежно від умов зовнішнього середовища і умов функціонування системи, що змінюється;

б) здатність утримувати суттєві перемінні внутрішнього середовища в допустимих межах (стосовно до технічних систем цю властивість називають **гомеостазом**, а до біосистем – **гомеостазисом**);

в) здатність пристосовуватись (адаптуватись) до зміни речовинного, енергетичного та інформаційного середовища (процес адаптації розглядається як зміна властивостей і поведінкових реакцій системи, спрямована на збереження її цілісності і гомеостазу на всіх системно-структурних рівнях організації);

г) здатність динамічно реагувати на зміни й впливи навколишнього середовища за рахунок структурно-функціональних перебудов (властивість динамічності);

д) властивість якісної неоднорідності, яка виявляється в тому, що в рамках однієї і тієї ж функціональної системи спільно і злагоджено працюють підсистеми з якісно різними керуючими сигналами (речовинними, енергетичними, інформаційними);

е) властивість тимчасової неоднорідності, яка проявляється в тому, що в одній функціональній системі взаємодіють підсистеми з різними постійними часу (повільні, швидкі, надшвидкі);

ж) властивість структурно-функціональної організованості, що виявляється у високій стійкості структури і функцій системи;

з) властивість структурно функціональної стохастичності, яка проявляється в різновиді реакцій у відповідь на одні й ті ж дії середовища;

к) властивість структурної дискретності, що виявляється в можливості поділу системи на дискретні елементи, компоненти, підсистеми;

л) властивість функціональної безперервності, тобто варіабельність кількісних параметрів у межах однієї і тієї ж дискретності.

До *властивостей, що характеризують тактику і стратегію поведіння системи*, відносять:

а) властивість спонтанної чи внутрішньої активності;

б) властивість цілеспрямованої активності.

Властивість *спонтанної активності* є найважливішою для будь-якої біологічної системи. Визначаючи організм як спонтанно активну систему, Л. Берта-ланфі писав, що “навіть при постійних зовнішніх умовах і при відсутності зовнішніх стимулів організм являє собою не пасивну, а істотно активну систему. Про це свідчать, зокрема, функція нервової системи і поведінка. Внутрішня активність, а не реакції на стимули лежить в основі цих процесів. Можна також показати, що це поняття справедливе і для еволюції нижчих тварин, і для розвитку перших рухів ембріонів, і утробного плоду”.

Властивість спонтанної активності ще більше відноситься до людини, що обумовлено її соціальною природою. Ця властивість лежить в основі мотивації цілеположення і поведіння, а також становлення різних форм пристосування. Ясно, що оскільки людина може виконувати рухи чи акти, а самі поняття руху чи акта не віддільні від поняття мети, тим самим властивість спонтанної активності визначає властивість бути багатоцільовою. При цьому під «багатоцільовою» розу-

міють можливість досягнення будь-якої мети з деякого набору цілей. Вибір цілей і порядок їхнього досягнення має спонтанний характер.

Спонтанна активність мінімальна в зоні комфорту. Так, водій, керуючи автомобілем, мимоволі качає кермове колесо, відшукуючи положення на проїзній частині дороги, при якому сумарне психічне примушення, що формується за рахунок впливу об'єктів середовища праворуч і ліворуч від напрямку руху, мінімальне. У випадку відшукування зазначеного мінімуму амплітуда качінь стає мінімальною. Аналогічне явище спостерігається в льотчика, що качає літак за рахунок мимовільного руху штурвала керування.

Вище вказувалось, що будь-яка дія чи рух невіддільний від поняття мети. Тому у випадку усвідомленого вибору мети спонтанна активність стає **цілеспрямованою**. У системах з цілеспрямованою активністю спонтанна активність підлегла закону диференціальної чутливості.

Спонтанна і цілеспрямована активність системи забезпечують її готовність підтримувати функціонування надсистеми.

### 1.10. Класифікація систем

Для класифікації систем широко використовують такі ознаки:

- 1) шлях прояву цілісності;
- 2) субстанціональну природу системи;
- 3) тип елементів;
- 4) тип відносин між елементами усередині системи і зовнішнім середовищем;
- 5) обумовленість взаємодії;
- 6) системоутворюючі властивості.

Залежно від **шляху прояву цілісності** системи розділяють на зовнішні й внутрішні.

*Внутрішня система* – це цілісне утворення, до якого можна застосувати членування, представляючи цю систему у вигляді деякої структури складових частин.

*Зовнішня система* – це клас об'єктів загальної природи, об'єднаних деякою цілісною сутністю. Елементи такої системи можуть не мати ні просторової, ні тимчасової спільності, ні навіть генетичного зв'язку. Важлива лише спільність природи утворюючих систему об'єктів.

**Субстанціональна природа** системи визначається її сутністю, характером і походженням. Звідки система – чи вона існує в об'єктивному світі, чи у свідомості людини. За цією ознакою виділяють чотири класи систем.

*Перший клас* систем – ті, що існують в об'єктивній дійсності, неживій і живій природі, суспільстві.

*Другий клас* – системи концептуальні, ідеальні. Елементами таких систем є поняття. Іноді ці системи називають абстрактними.

*Третій клас* – системи штучні, які спроектовані, сконструйовані й створені людиною.

*Четвертий клас* – змішані системи, в яких органічно злиті елементи, що є продуктом природи, і елементи, «придумані», створені людиною. Прикладом таких систем є система «людина – автомобіль».

**За типами елементів** розрізняють технічні, біологічні, біотехнічні, фізичні, хімічні, політичні, економічні системи та ін.

**За типом відносин між елементами всередині системи і зовнішнім середовищем** розрізняють відкриті й закриті системи, лінійні й нелінійні, ієрархічні, керовані системи, цілеспрямовані, адаптивні, системи, що само організуються, та ін.

Еквівалентні за типом відносин системи об'єднуються в класи, усередині класів формуються підкласи. Таку еквівалентність називають ізоморфізмом. Тому системи в класах і підкласах ізоморфні.

У *закритих системах* надходження із зовнішнього середовища речовини, енергії та інформації не приводить до зміни стану системи. Закрита система розглядається як абсолютно відособлена, що не має зовнішніх входів і виходів. У реальній дійсності такі системи не існують. Але часто виявляється зручним користуватись такою абстракцією, обриваючи на деякому кроці зовнішні зв'язки.

У *відкритих системах* надходження ззовні речовини, енергії чи інформації змінюють систему. Елементи відкритих систем можуть бути віднесені або до зовнішньої системи, або до зовнішнього середовища.

**Лінійність чи нелінійність** системи визначається її статичною характеристикою. Під *статичною характеристикою* системи розуміють зв'язок між величиною зовнішнього впливу  $x(t)$  на систему (величиною вхідного сигналу) і максимальною величиною (амплітудою) вихідної характеристики  $y_m$ . Якщо  $y_m = f(x)$  лінійна, то і система лінійна. Нелінійність статичної характеристики і наявність запізнювання в реагуванні є ознакою нелінійності системи.

Поняття «лінійності» означає наявність деякого виду пропорційності між вхідними й вихідними перемінними. Точне математичне визначення лінійності пов'язане з нульовим станом системи і нульовим вхідним впливом.

Система називається *лінійною щодо нульового стану*, якщо вона задовольняє таким двом умовам:

1. *Однорідність*. Якщо  $y$  є реакція на нульовий стан при довільному вхідному впливі  $x$ , тоді  $cy$  є реакція на нульовий стан при вхідному впливі  $cx$ , де  $c$  - довільна константа.

2. *Адитивність*. Якщо  $y_1$  є реакція на нульовий стан при довільному вхідному впливі  $x_1$ , а  $y_2$  є реакція на нульовий стан при довільному вхідному впливі  $x_2$ , тоді  $y_1 + y_2$  є реакція на нульовий стан при вхідному впливі  $x_1 + x_2$ .

Систему називають *лінійною щодо нульового вхідного впливу*, якщо виконуються дві умови:

1. *Однорідність*. Якщо реакція на нульовий вхідний вплив для будь-якого довільного початкового стану  $Q_0$  є  $y_0$ , тоді реакція на нульовий вхідний вплив  $cx_0$  є  $cy_0$ .

2. *Адитивність*. Якщо  $y_1$  є реакція на нульовий вхідний вплив при будь-якому довільному початковому стані  $Q_1$ , а  $y_2$  - реакція на нульовий вхідний вплив при будь-якому довільному початковому стані  $Q_2$ , тоді  $y_1 + y_2$  - реакція на нульовий вхідний вплив при початковому стані  $Q_1 + Q_2$ .

Для лінійної системи важлива наявність властивості *декомпозиції*.

Система має *властивість декомпозиції*, якщо вона задовольняє такій умові: якщо  $y_0$  - реакція на нульовий вхідний вплив для довільного початкового стану і  $y_u$  - реакція на нульовий стан для довільного початкового вхідного впливу, тоді результуюча реакція на той же початковий стан і вхідний вплив є  $y_0 + y_u$ .

Таким чином, система може бути названа *лінійною*, якщо вона лінійна щодо нульового стану, лінійна щодо вхідного впливу і задовольняє умові декомпозиції.

До лінійної системи застосуємо принцип *суперпозиції*. Відповідно з цим принципом при впливі на систему декількох вхідних сигналів кожен з них фільтрується, начебто ніякі інші сигнали на систему не діють. Загальний вихідний сигнал за принципом суперпозиції утвориться в результаті підсумовування її реакції на кожен вхідний сигнал.

*За обумовленістю дії* розрізняють системи з детермінованою дією і системи з випадковою (імовірнісною, стохастичною) дією.

У *детермінованій* системі складові її елементи і зв'язки між ними взаємодіють точно передбаченим способом. У цих системах при фіксованих зовнішніх умовах і способі керування перехід з одного стану в інший цілком визначений.

У *випадковій* (імовірнісній, стохастичній) системі складові її елементи і зв'язки між ними взаємодіють таким чином, що не можна зробити точного, детального передбачення її поведінки. Така система завжди залишається невизначеною, і передбачення про її майбутнє поведінки ніколи не виходить з рамок імовірнісних категорій, за допомогою яких це поведінка описується.

Стосовно детермінованої системи можна говорити про статичність чи динамічність.

Для *статичної* системи середні арифметичні значення вихідного сигналу на різних відрізках часу не виходять за допустимі межі, обумовлені точністю методики виміру досліджуваного показника.

У *динамічній* системі середнє арифметичне значення вихідного сигналу на різних відрізках часу змінюється, оскільки в такій системі відбувається зміна станів її елементів. Елементи системи, що змінюються, розглядаються як змінні величини. Якщо ці змінні величини допускають їхній вимір і представлення у вигляді конкретних чисел, то можна допустити конкретну оцінку стану системи. Ця оцінка відбиває кількість інформації, що міститься в системі, тобто те, що можна довідатись про неї.

Розрізняють *безперервні* й *дискретні* динамічні системи. У першому випадку процес перетворення вхідного сигналу у вихідну характеристику розглядається в часі як безперервний, у другому – тільки у фіксовані (дискретні) моменти.

Усе вищевикладене показує, що динамічними можна назвати системи, в яких відбуваються зміни в часі.

*Випадкові* системи поділяються на *стаціонарні*, *нестационарні* й *ергодичні*. Такий розподіл систем заснований на різній залежності від часу основних статистичних характеристик.

Поняття стаціонарності різне у вузькому й широкому смислах.

У вузькому смислові система стаціонарна, якщо відсутня зміна в часі математичного чекання і дисперсії вихідного сигналу, чи зміна залежності між членами ряду.

У широкому смислі у стаціонарній системі математичне чекання не залежить від часу, а автокореляційна функція залежить тільки від величини інтервалу  $\tau = t_2 - t_1$ .

Система, стаціонарна в вузькому смислі, завжди стаціонарна в широкому смислові. Зворотнє твердження не справедливе. Для процесів, підпорядкованих

нормальному закону розподілу, поняття стаціонарності у вузькому й широкому смислах співпадають.

У різних системах властивість стаціонарності виражена неоднаково. В одних процесах стаціонарність зберігається протягом тривалого часу, в інших – лише на коротких відрізках часу. Розрізняють *ергодичні* й *неергодичні* стаціонарні системи. Для ергодичних систем усереднення за часом однієї реалізації вихідної характеристики досить великої тривалості рівносильне усередненню за ансамблем реалізацій деяким часом. Для ергодичної системи автокореляційна функція прагне нуля при необмеженому збільшенні  $\tau = t_2 - t_1$ . У неергодичних системах ця умова не виконується.

*За системоутворюючими властивостями* розрізняють: прості, складні, дуже складні системи, метасистеми, розчленовані й нерозчленовані, елементарно автономні та елементарно неавтономні, варіативні й неваріативні, елементарні і неелементарні, іманентні й неіманентні, суцільнонадійні і несуцільнонадійні, однорідні й неоднорідні, завершені й незавершені, мінімальні й немінімальні системи та ін.

*Простими* прийнято вважати системи, що не мають розгалуженої структури (не можна виділити ієрархічні рівні), з невеликою кількістю взаємозалежних і взаємодіючих елементів, які виконують найпростіші функції. Ці системи легко піддаються опису.

*Складними* вважають системи з розгалуженою структурою і значною кількістю взаємозалежних і взаємодіючих елементів, що виконують більш складні функції. Високий ступінь зв'язності елементів у складних системах приводить до того, що зміна якого-небудь одного елемента чи зв'язку спричиняє зміну багатьох інших елементів системи. У складних системах можлива наявність декількох різних структур, декількох різних цілей. Але конкретний стан складної системи може бути описаний.

*Дуже складними* називають такі системи, стан яких тих чи інших причин неможливо докладно й точно описати.

*Метасистеми* – це надскладні системи, для яких сучасний рівень знань недостатній для проникнення в суть зв'язків системи або вони незрозумілі.

У терміні «метасистема» використовується грецький префікс «мета». У перекладі з грецького він має три значення:

- 1) «мета X» називається те, що спостерігається (має місце) після X, тобто є передумовою мета X;
- 2) вираження «мета X» показує, що X міняється і служить загальною назвою цієї зміни;

3) «мета Х» використовується як назва того, що вище Х в тому смислі, що воно більш високо організовано, має більш високий логічний тип чи розглядається в більш широкому смислові.

«Метасистема» включає всі три смисли цього поняття. Отже:

- 1) метасистема може бути визначена тільки після того, як визначені інші типи систем;
- 2) метасистема описує зміну – заміну однієї системи іншою;
- 3) метасистема вище інших систем.

Комбінуючи різниці систем за обумовленістю дії і за ступенем складності, виділяють дев'ять типів систем, яким можна дати такі визначення:

1. *Проста система з детермінованою дією.* Ця система містить мало елементів і взаємних зв'язків, легко описується, її динамічні властивості легко передбачати.

2. *Складна система з детермінованою дією* має розгалужену структуру, багато елементів із складними зв'язками, доступна в описі. Зміну її станів можна передбачати. У подібних системах кожне відхилення від заздалегідь передбаченої дії є помилкою, що свідчить про псування системи.

3. *Дуже складні системи з детермінованою дією* практично не піддаються опису, хоча і зустрічаються в житті.

4. *Прості системи з квазидетермінованою дією.* Ці системи функціонують у детермінованому режимі лише в окремі періодично повторювані відрізки часу. На цих відрізках вони легко описуються. Поводження таких систем на інших відрізках часу можна передбачити із залученням теорії імовірностей.

5. *Складні системи з квазидетермінованою дією.* Ці системи ще піддаються опису в детермінованому режимі функціонування. Але розвиток таких систем точно передбачити неможливо.

6. *Дуже складні системи з квазидетермінованою дією.* На детермінованих ділянках функціонування таких систем можна приблизно описати їхнє поведження, на імовірнісних – неможливо ні описати, ні передбачити точно їхній розвиток.

7. *Прості системи з імовірнісною дією.* Можливе передбачення їхнього поведження із залученням теорії імовірностей.

8. *Складні системи з імовірнісною дією.* Ці системи піддаються опису в статистичному, фотографічному опису. Розвиток таких систем точно передбачити неможливо.

9. *Дуже складні системи з імовірнісною дією.* Ці системи практично описати неможливо.



Слід розрізняти поняття «великої» і «складної» системи. У понятті «великої системи» фіксується співвідношення різновидів системи, що спостерігається, і можливостей її спостереження і дослідження. При виділенні такої системи задається одне відношення між її елементами. Якщо ж при виділенні системи задається не одне, а безліч відносин між елементами і відповідно утворюється не одна, а безліч структур, то така система характеризується неоднорідністю, різноякісністю виділених елементів і зв'язків, структурною розмаїтістю. Таку систему називають складною. Поєднання величини і складності формує *великі прості* й *великі складні* системи.

Вище показано, що складність системи кількісно може бути оцінена за допомогою максимальної ентропії системи. Відносна організація характеризує умовленість поведінки системи.

Враховуючи, що складність і відносна організація не зв'язані між собою лінійно, здається можливим використовувати ці характеристики для побудови класифікаційної діаграми систем (рис. 8).

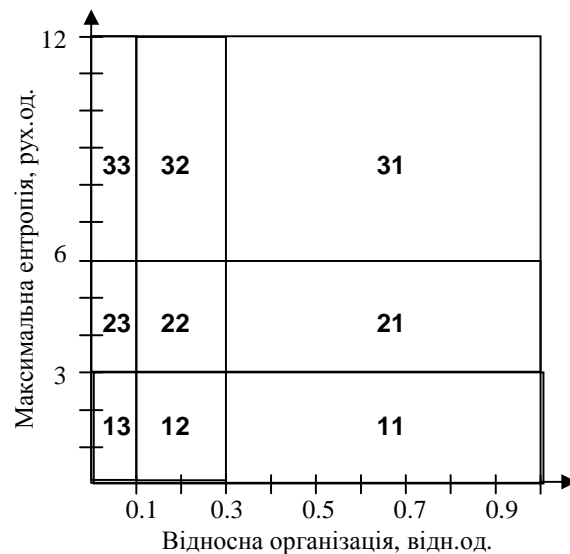


Рис. 8 – Класифікаційна діаграма:

- 11-13 – проста детермінована, квазидетермінована, імовірнісна системи;
- 21-23 – складна детермінована, квазидетермінована, імовірнісна системи;
- 31-33 – дуже складні системи.

При цьому для класифікації систем за складністю можна користуватись шкалою С. Біра:

- прості системи ( $0 \leq H_m \leq 3$ );
- складні системи ( $3 < H_m \leq 6$ );
- дуже складні системи ( $6 < H_m \leq 12$ );
- метасистеми ( $H_m > 12$ ).

У свою чергу, для класифікації систем за обумовленістю дії можна користуватись шкалою Ю.Г. Антомонова:

- детерміновані системи ( $0.3 < R \leq 1$ );
- квазидетерміновані системи ( $0.1 < R \leq 0.3$ );
- імовірнісні системи ( $0 < R \leq 0.1$ ).

Розподіл систем відносний. Ця відносність виявляється в наступному: кожна система може характеризуватись і вивчатись з різних позицій, що визначається точкою зору дослідника; кожна система може бути представлена як елемент більш загальної суперсистеми (системи більш високого рангу, порядку). У той же час елементи чи групи елементів даної системи у визначених умовах можна розглядати як системи.

Групи елементів, що розглядаються як системи більш низького рангу, виділяються. При цьому враховують відносно стійкий порядок внутрішніх відносин між елементами системи і внутрішню структуру системи. Таким чином, класифікація систем завжди прив'язується до деякого рівня, тобто до їхнього ієрархічного розташування у структурі організаційної побудови систем.

В ієрархії систем первинним прийнято вважати такий елемент чи таку сукупність елементів системи, що не допускають їхнє подальше розчленовування без втрати основної якості всієї системи, враховуючи обрану дослідником точку зору.

Система другого рівня (порядку) поєднує дві й більше первинні системи; третього рівня (порядку) – дві й більше системи другого порядку та ін. При виділенні систем другого, третього і подальшого порядків виходять з таких принципових положень:

- поділ системи на внутрішні підсистеми здійснюється так, щоб загальна цілеспрямованість функціонування всієї системи зберігалась;
- виділення внутрішніх підсистем здійснюється, враховуючи виникнення деяких особливих характеристик для кожного з виділених рівнів;
- кількість виділених рівнів має бути мінімальною, але не повинна утруднювати (ускладнювати) вивчення систем кожного рівня.

Ієрархічна побудова систем як методичний прийом дозволяє успішно вирішувати багато практичних питань, пов'язаних з удосконаленням керування.

Цілеспрямований розвиток *складних і дуже складних імовірнісних систем* має потребу в керуванні. Якщо на систему здійснюється цілеспрямований вплив і система реагує на нього, то такі системи називають *керованими системами*.

У кожній керованій системі можна виділити дві підсистеми – керовану і керуючу. Враховуючи такий розподіл саме *керування* можна охарактеризувати, як такий цільовий вплив виконавця (керуючої підсистеми) на об'єкт функціонування (керовану підсистему), при якому керована система переходить з безлічі різних можливих її станів у такий стан, при якому досягається визначена необхідна (що задається) мета.

## ТЕМА 2. ОПТИМІЗАЦІЯ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ

### 2.1. Композиція і декомпозиція причинно-наслідкових відносин між елементами системи

Основною операцією аналізу є поділ цілого на частини. Задача розпадається на підзадачі, система – на підсистеми, цілі – на підцілі. При необхідності цей процес повторюється, що приводить до ієрархічних деревоподібних структур.

На початковому етапі поділ досліджуваного об'єкта на частини виконує експерт. Як основу для розподілу експерт використовує деяку модель. Операція поділу (декомпозиції) представляється як зіставлення об'єкта аналізу з моделлю і виділення в ньому того, що відповідає елементам узятій моделі. Використану експертом модель називають *моделлю-основою*.

У ролі моделей-основ на початковому етапі використовують моделі формальних типів: моделі «чорної скриньки», складу, структури, конструкції та ін. Прикладом формальної моделі є загальна схема діяльності людини, в якій відображені всі можливі компоненти і всі можливі зв'язки між ними (рис. 3.4). Іншим прикладом формальної моделі є модель організаційної системи (рис. 3.5). Звичайно формальна модель має глобальний, загальний характер і відноситься до проблемо-вирішуючої ситуації. Формальна модель-основа – це укрупнене представлення досліджуваного об'єкта і його зв'язків з іншими системами і середовищем.

Формальна модель має бути повною, тому повинна враховувати якнайбільше зв'язків і відношень. У дослідженнях із штучного інтелекту формальні моделі називають *фреймами*.

Вибір формальної моделі лише підказує, якого типу має бути модель-основа. Надалі формальна модель повинна бути наповнена змістом, щоб стати основою для декомпозиції. Наприклад, у фреймовій моделі входів оргсистеми (рис. 3.5) потрібно визначити конкретно, що саме розуміють під «суттєвим середовищем», тобто взаємодія з якими реальними системами зовнішнього середовища має ввійти в основу.

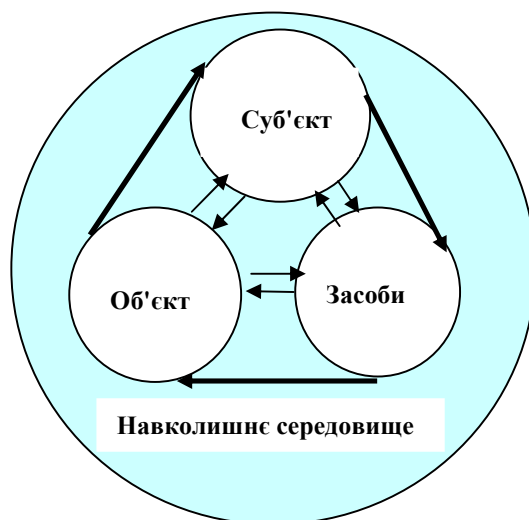


Рис. 9 – Загальна схема діяльності

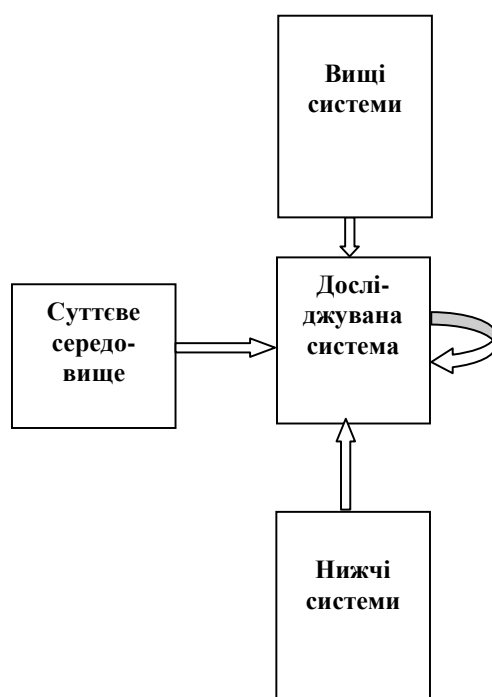


Рис. 10 – Схема входів організаційної системи

Щоб зберегти повноту і можливість розширення змістовної моделі, здійснюють логічне замикання переліку елементів моделі компонентою «все інше». Ця компонента, як правило, буде вважатись «той, що мовчить», тому що до неї віднесено в, що здається несуттєвим, але її присутність буде постійно нагадувати експерту, що, можливо, він не врахував щось важливе.

Змістовна модель-основа має відповідати двом суперечливим вимогам. Вона повинна бути одночасно простою і повною. Вимога простоти змушує використовувати найбільш компактні моделі-основи. Навпаки, вимога повноти змушує брати найбільш розвинуті, докладні моделі.

*Компромiс* досягається за рахунок того, що в модель включають тільки компоненти і зв'язки, суттєві стосовно мети аналізу. Такі компоненти і зв'язки називають *релевантними*.

Вирішення питання про суттєвість покладається на експерта. Аналогічні вимоги ставляться і до глибини деталізації моделі. Декомпозиція моделі закінчується, коли вона приводить до результату, що не вимагає подальшого розкладання, тобто результату простого, зрозумілого, реалізованого, забезпеченого, свідомо здійсненого. Такий результат називають *елементарним*. Поняття елементарності в деяких математичних задачах може бути конкретизовано до формальної ознаки. В інших задачах перевірка фрагментів на елементарність доручається експертам.

Неелементарний фрагмент підлягає подальшій декомпозиції за іншою моделлю-осною (що не використовувалася раніше). Нові моделі-основи одержують способом введення в початкові інші суттєві елементи через розщеплення вже наявних. Через те, що неелементарний фрагмент відноситься до деякого компонента моделі-основи, то розщепленню піддається саме цей компонент. На цій же стадії використовують і нові елементи з початкової компоненти «все інше».

Таким чином, компромiс між вимогою простоти і повноти змістовної моделі досягається через *суттєвість, елементарність, поступову деталізацію та ітеративність* процесу декомпозиції (рис. 11).

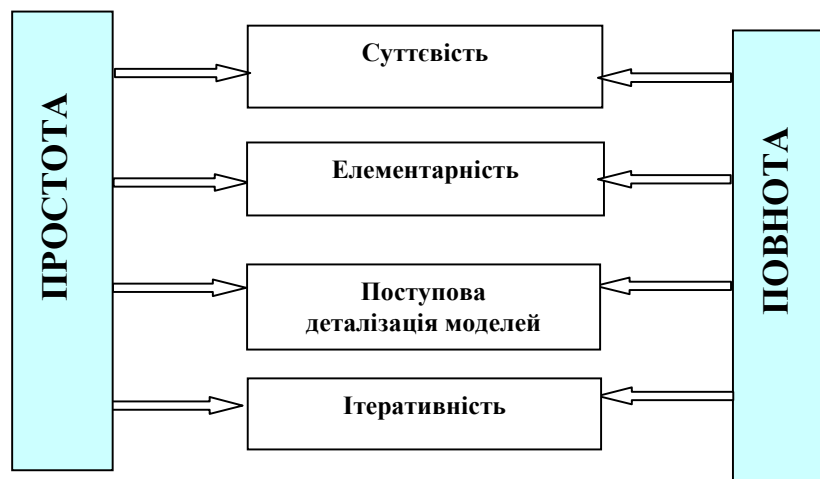


Рис. 11 – Схема компромiсів між вимогами простоти і повноти аналізу

Ітеративність процесу декомпозиції додає йому варіабельність, можливість користуватись моделями різної детальності на різних галузях, поглиблювати деталізацію скільки завгодно (якщо це буде потрібно). Але, незважаючи на наявність ітеративності, може наступити момент, коли експерт визнає, що його компетентності недостатньо для подальшого аналізу. Тоді треба залучити іншого експерта. У висновку можна сказати, що процес декомпозиції не дає нових знань, а тільки «витягає» знання з експертів, структурує і організує їх. Укрупнена схема алгоритму процесу декомпозиції представлена на рис. 3.7.

У процесі декомпозиції систему розчленовують на усе менш складні (і кінець кінцем, прості) частини. При цьому розкривають лише структуру системи, одержують знання про те, як система працює, але залишається відкритим питання чому і навіщо вона це робить. Ці знання одержують на другому етапі моделювання, що називають *агрегуванням* (об'єднанням частин у ціле). Техніка агрегування ґрунтується на використанні моделей частин системи, отриманих на етапі декомпозиції. У процесі агрегування встановлюють відносини між цими моделями. Залежно від того, які відносини встановлюються (тобто виявляються чи встановлюються), виходить досить велика кількісно і різноманітна якісно безліч задач агрегування.

Основними агрегатами, типовими для системного аналізу є: ***конфігуратор, агрегати-оператори, агрегати-структури.***

***Конфігуратор*** – це сукупність мов описування системи. Усякий процес вимагає різнобічного, багатопланового описування, розгляду з різних точок зору. Тільки спільне (агреговане) описування у термінах декількох якісно різних мов дозволяє охарактеризувати явище з достатньою повнотою.

Назвавши мови, на яких будемо говорити про систему, ми тим самим визначаємо тип системи, фіксуємо наше розуміння природи системи.

***Агрегати-оператори*** – конкретизація відношення, зокрема класифікація, упорядкування, числові функції, пошук закономірностей та ін. Даний агрегат поєднує частини у щось ціле, єдине, окреме. Найпростіший спосіб агрегування полягає у встановленні відношення еквівалентності між агрегованими елементами, тобто утворення класів. У результаті є відповідь на запитання, до якого класу відноситься конкретний елемент. Інший тип агрегату – оператора виникає, якщо агреговані ознаки фіксуються у числових шкалах. Тоді з'являється можливість задати відношення на безлічі ознак у вигляді числової функції багатьох перемінних, яка є агрегатом. Прикладом може бути перехід від багатокритеріальної оптимізаційної задачі до однокритеріальної за допомогою агрегування декількох критеріїв в один суперкритерій. Побудова суперкритеріальної функції, власне кажучи, є по-

будовою моделі системи.

Іншим прикладом агрегатів-операторів є *статистики*, тобто функції вибіркового значень. Статистичним агрегуванням є факторний аналіз, в якому декілька перемінних зводяться в один фактор.

**Агрегати-структури** – це описування зв'язків на всіх мовах конфігуратора. При синтезі ми створюємо, визначаємо, нав'язуємо структуру проєктованій системі. Якщо це не абстрактна, а реальна система, то в ній цілком реально виникнуть, установляться і почнуть «працювати» не тільки ті зв'язки, що ми спроектували, але і безліч інших, не передбачених нами, що впливають із самої природи, зведених в одну систему елементів. Тому при проєктуванні системи важливо задати її структури у всіх суттєвих відносинах, тому що в інших відносинах структури складуться самі, стихійним чином. Сукупність всіх суттєвих відносин визначається конфігуратором системи, і звідси виходить, що проєкт будь-якої системи має містити розробку стільки структур, скільки мов включено в її конфігуратор.

## 2.2. Умови статичної рівноваги системи в замкненому стані

Відповідно до принципу "необхідної організації" Ю.Г. Антомонова адекватність між компонентами системи наукового дослідження в замкненому стані й навколишнім середовищем встановлюється при виконанні умови

$$Q_i = Q_{cep.i},$$

де  $Q_i$  – абсолютна організація  $i$ -того компонента системи наукового дослідження;  $Q_{cep.i}$  – абсолютна організація зовнішнього середовища для  $i$ -того компонента.

Під абсолютною організацією (згідно з Ю.Г. Антомоновим) розуміють реалізовану в системі невизначеність. У замкненому стані системи абсолютну організацію визначають за формулою

$$Q = H_m - H,$$

де  $H_m, H$  - максимальна і поточна ентропії системи.

Таке визначення називають **законом збереження ентропії**.

Враховуючи цю умову, рівняння статичної рівноваги  $i$ -того компонента

$$Q_{cep.i} - Q_i = 0.$$



### 2.3. Умови динамічної рівноваги системи в замкненому стані

При порушенні статичної рівноваги абсолютна організація  $i$ -того компонента системи змінюється на величину  $dQ_i$  за елементарний інтервал часу  $dt$ . Тому умову динамічної рівноваги  $i$ -того компонента можна подати у вигляді

$$\frac{dQ_i}{dt} = \Delta Q_{cep.i} - \Delta Q_i.$$

Якщо покласти, що кожен компонент системи може знаходитись лише в двох станах (фактичному і заданому), тоді

$$Q = 1 + P_i \log P_i + (1 - P_i) \log (1 - P_i).$$

Припустимо, що

$$\text{при } P_i \leq 0,5 \quad Q = 1 - 2P_i,$$

$$\text{при } P_i > 0,5 \quad Q = 2P_i - 1.$$

Звідси

$$dQ_i = C_i dt,$$

де  $C_i$  – організаційна ємність  $i$ -того компонента.

Отже рівняння динамічної рівноваги здобуває вигляд

$$C_i \frac{dP_i}{dt} = \Delta Q_{cep.i} - \Delta Q_i.$$

Середовищем для людини є старі, нові засоби дослідження і всі зовнішні фактори, що впливають на його стан. До зовнішніх можна віднести економічні, організаційні, погодно-кліматичні та інші фактори. Старими засобами дослідження середовищем є людина, нові засоби дослідження і всі зовнішні фактори. Новими засобами дослідження – людина, старі засоби дослідження і всі зовнішні фактори.

Оскільки кожен компонент системи прагне зрівноважитися із середовищем, то абсолютна організація цього середовища виступає в ролі своєї норми, до якої прагне компонент.

Норма абсолютної організації компонента системи наукових досліджень згідно Г.А. Голіциним може бути визначена як середньозважена з індивідуальних норм компонентів, що формують зовнішнє середовище:

$$Q_{ni} = \frac{\sum_{j=1}^m \gamma_j^{(i)} Q_{nj}^{(i)}}{\sum_{j=1}^m \gamma_j^{(i)}},$$

де  $Q_{ni}$  - норма абсолютної організації  $i$ -того компонента системи;  $Q_{nj}^{(i)}$  - норма абсолютної організації  $j$ -того компонента середовища для  $i$ -того компонента системи;  $\gamma_j^{(i)}$  - жорсткість норми  $Q_{nj}^{(i)}$ .

Тут і далі під нормою розуміють оптимальну абсолютну організацію, що найбільшою мірою відповідає цілям і завданням функціонування системи.

Динаміка норми абсолютної організації описується рівнянням Г.А. Голіци-на

$$Q_{ni}(t) = \frac{1}{T_{II}} \int_{t-T_{II}}^t Q_i(\tau) d\tau,$$

де  $Q_i$  - поточне значення абсолютної організації  $i$ -того компонента системи;  $T_{II}$  - глибина пам'яті.

Тому норма  $i$ -того компонента поводитья подібно до інерційної системи, що стежить: "відслідковує" дійсне значення перемінної. Якщо перехід зі стану  $Q_i(0)$  у стан  $Q_{ni}$  триває досить довго, тоді можна прийняти

$$Q_{ni} = \frac{\sum_j^3 \gamma_j^{(i)} Q_j^{(i)}}{\sum_j^3 \gamma_j^{(i)}}.$$

У розімкненому стані системи йде формування нового засобу наукового дослідження. Останнє реалізується через збільшення числа елементів, що поступають у систему із середовища.

## 2.4. Умови встановлення адекватності між системою і середовищем у розімкненому стані

При зміні числа елементів і зв'язків між ними змінюється максимальна ентропія системи. Одночасно система прагне досягти нового рівня адекватності із середовищем.

Процес встановлення адекватності динамічний і для кожного моменту часу має вигляд

$$\begin{aligned}H_m^s(t) &\approx H_m^e(t), \\H^s(t) &\approx H^e(t),\end{aligned}$$

де  $H_m^s, H_m^e$  - максимальні ентропії системи і середовища відповідно;  $H^s, H^e$  - поточні ентропії системи і середовища відповідно;  $s, e$  - індекси приналежності до системи і до середовища;  $t$  - час.

Відповідно до принципу Г.А. Голіцина про оптимальну швидкість задоволення потреб, у рівноважному стані швидкості задоволення потреб залишаються постійними і рівними оптимальній швидкості, тобто

$$\begin{aligned}\frac{dH_m^s}{dt} &= a = const, \\ \frac{dH^s}{dt} &= b = const.\end{aligned}$$

Якщо при  $t = 0$   $H_m^s = H_{m0}^s, H^s = 0$ , тоді

$$H_m^s = H_{m0}^s + at,$$

або

$$H_m^s = H_{m0}^s + \frac{a}{b} H^s.$$

Якщо при  $t = 0$   $H_m^s = H_{m0}^s, H^s = H_0^s$ , тоді

$$H_m^s = H_{m0}^s + at, \quad H^s = H_0^s + bt.$$

Враховуючи закон збереження організації Ю.Г. Антомонова, можна записати

$$Q^s(t) = H_m^s(t) - H^s(t),$$

або

$$Q^s(t) = H_{m0}^s - (b - a)t,$$

де  $Q^s$  - абсолютна організація системи.

Диференціюючи  $Q^s(t)$  за часом, одержимо

$$\frac{dQ^s}{dt} = a - b.$$

Останнє рівняння дозволяє встановити умову підвищення рівня організації системи наукового дослідження в розімкненому стані:

$$\frac{dQ^s}{dt} > 0, \text{ якщо } a > b.$$

Надходження речовини, енергії та інформації із зовнішнього середовища може відбуватися стрибкоподібно. У такому разі зміни максимальної ентропії системи будуть мати слабкоколивальний характер із загасанням і прагненням процесу до деякого сталого значення адаптації з часом. Перехідні процеси такого типу описуються вирішенням неоднорідного диференціального рівняння другого порядку з комплексно-сполученими коренями характеристичного рівняння

$$\frac{d^2 H_m}{dt^2} + p_1 \frac{dH_m}{dt} + q_0 H_m = R_3,$$

де  $R_3$  - зовнішній вплив.

Вирішення цього рівняння для ненульових початкових умов може бути подане у вигляді

$$H_m = e^{-\alpha t} \left[ \frac{H'_{m0} + \alpha(H_{m0} - H_{my})}{\beta} \sin \beta t + (H_{m0} - H_{my}) \cos \beta t \right] + H_{my},$$

де  $H_{m0}, H'_{m0}$  - максимальна ентропія і її похідна при  $t = 0$ ;  $\alpha$  - декремент загасання коливаний,  $\alpha = \frac{P_1}{2}$ ;  $\beta$  - кругова частота,

$$\beta = \sqrt{q_0 - \frac{P_1^2}{4}};$$

$H_{my}$  - значення максимальної ентропії, що встановилося (межа адаптаційних можливостей системи),

$$H_{my} = \frac{R_3}{q_1}.$$

При нульових початкових умовах, тобто при  $t = 0$   $H_{m0} = \dot{H}_{m0} = 0$

$$H_m = H_{my} [ 1 - e^{-\alpha t} ( \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta t + \cos \beta t ) ].$$

Аналогічна закономірність зміни поточної ентропії системи

$$H^s(t) = e^{-\alpha t} [ \frac{\dot{H}_0 + \alpha(H_0 - H_y)}{\beta} \sin \beta t + (H_0 - H_y) \cos \beta t ] + H_y,$$

де  $H_y$  - значення поточної ентропії, що встановилося;  $H_0, \dot{H}_0$  - початкове значення поточної ентропії і її похідна.

На рис. 12 наведена типова схема адаптації. Коливальний характер кривої дозволяє говорити про перевагу тих чи інших механізмів у часі й розділити всю динаміку адаптації на етапи. На першому етапі від початку адаптації до першого максимального значення максимальної ентропії переважає мобілізація структурно-функціональних резервів, на другому, від першого максимуму до першого мінімуму, - накопичення пошкоджених структур. Третій (від першого мінімуму до другого максимуму) характеризується процесами відновлення функцій первісно перетворених структур. Четвертий етап, до встановлення рівноваги, характеризується структурно-функціональним зрівноважуванням усіх процесів. П'ятий - рівновагою і значенням  $H_{my}$ .

Імовірності переходів з фактичного в заданий стан можуть використовуватись як вагові коефіцієнти цих станів. Тому в замкненому стані системи наукового дослідження її характеристики можуть бути передбачені на основі такої моделі:

$$X(t) = X_o q(t) + X_z p(t),$$

де  $X(t)$  - поточна кількісна характеристика компонента системи;  $X_o$  - кількісна характеристика компонента при  $t = 0$ ;  $X_z$  - задана характеристика компонента;  $q(t)$  - імовірність того, що компонент системи не перейшов у заданий стан;  $p(t)$  - імовірність переходу компонента у заданий стан.

$H_m$

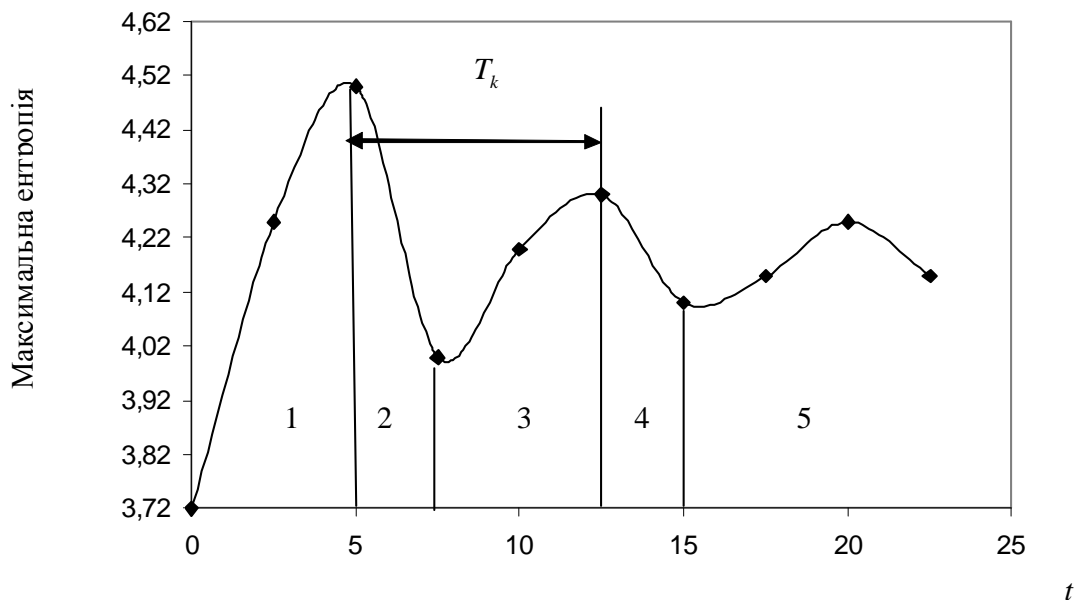


Рис. 12 – Крива адаптації

У розімкненому стані можна прийняти, що збільшення кількісної характеристики стану системи визначається різницею між максимальною невизначеністю стану системи і її поточною абсолютною організацією (Ю.Г. Антомонов, Л.І. Краснікова, О.Г. Чораян). З цього виходить емпірична формула

$$\Delta X^s(t) = \beta_i [H_m^s(t) - Q^s(t)] = \beta_i H^s(t),$$

де  $\Delta X^s(t)$  - збільшення кількісної характеристики стану системи;  $H_m^s, H^s$  - максимальна і поточна ентропія системи;  $Q^s$  - абсолютна організація системи;  $\beta_i$  - коефіцієнт пропорційності й розмірності.

Отже, модель прогнозування характеристик стану розімкненої системи може бути подана у вигляді

$$X^s(t) = X_0^s + \beta H^s(t),$$

де  $X_0^s$  - кількісна характеристика стану системи при  $t = 0$ .

Аналогічні моделі можуть бути отримані для кожного з компонентів системи.

Розглянуті закономірності еволюції системи наукового дослідження притаманні всьому класу систем «людина – техніка – середовище». Ці закономірності можуть використовуватися при вирішенні задач прогнозування властивостей компонентів систем і необхідних професійних якостей особистості людини для управління технічними системами.

## ТЕМА 3. УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ

### 3.1. Етапи прийняття рішення

*Прийняття вирішення* – це дія над множиною альтернатив, у результаті якої виходить підмножина обраних альтернатив. *Процедура ухвалення рішення* включає такі етапи чи фази: ініціативу, описування проблеми, аналіз ситуації, постановку задачі, аналіз наявної інформації, дискретизацію і комбінування зовнішніх умов, розробку альтернатив, перевірку результатів, оформлення рішення.

*Ініціатива* може бути зовнішньою (замовленою) або власною, коли на підставі власних спостережень приходять до переконання, що потрібно шукати раціональний спосіб досягнення поставленої мети. При цьому мета може бути споконвічно відомою чи характеризуватися великим числом варіантів. Часто немає необхідності докладно описувати саму задачу, тому що її структура досить ясна і спосіб вирішення певним чином впливає з життєвого досвіду. Такі рутинні вирішення звичайно протікають за схемою: ініціатива (замовлення), ознайомлення з задачею, порівняння з аналогічними чи схожими вирішеннями, визначення раціональних варіантів. Для складних чи нових задач з однозначними параметрами необхідна точна і докладна постановка задачі. У цьому випадку необхідно мати значний обсяг інформації, що стосується і мети задачі. Безпосередньо з постановки задачі впливає безліч раціональних варіантів її вирішення.

*Дискретизація варіантів вирішення* може бути природною чи штучною. В останньому випадку її вибирають прийнятним вирішенням. При цьому немає загального підходу. Надійним є ітераційний метод. Спочатку проводять грубу дискретизацію і розраховують вирішення в першому наближенні. Потім біля цього наближеного вирішення формують ряд більш детально дискредитованих альтернатив і з більшою точністю наближаються до оптимуму.

При дискретизації параметрів зовнішніх умов вибирають їхні представницькі значення так, щоб розв'язувана задача описувалась досить точно, але щоб число значень параметра в інтересах спрощення розрахунків було якнайменше. Звичайно використовують середні й крайні значення параметрів. Якщо можливі стани параметра представляють багатьма значеннями, тоді доцільно виходити з рівномірного поділу діапазону зміни параметра, а як представницькі значення вибирають середини інтервалів. Бажане формулювання задачі виходить з комбінації обраних представницьких значень, що мають адекватно характеризувати аналізований параметр зовнішніх умов.

За другим методом усередині обраної області розташовують рівномірну сітку. На цій сітці вибирають задане число вузлових точок таким чином, щоб відс-



тань їх одна від одної була максимальною. Для відбору застосовують теорію лінійних кодів.

Третій метод формального відбору заснований на використанні методу Монте-Карло і методу класифікацій. За заданими яким-небудь чином розподілами параметра визначають статистично велике число точок в області невизначеності параметра. Отриману безліч точок розділяють на  $N$  груп. Групові "центри" вибирають при цьому так, щоб середньоквадратична відстань між точками в групі була мінімальною, а відстані між центрами – максимальними.

### **3.2. Шкали корисності для оцінки наслідків прийняття вирішення. Формування результату вирішення**

Для того щоб зробити розумний вибір між різними варіантами вирішення, необхідно оцінити його наслідки. Причому дана оцінка має бути зроблена за однозначними правилами.

Наслідки вирішення можуть оцінюватись за допомогою різних шкал корисності: *номінальної шкали, шкали упорядкованості, інтервальної, масштабної*.

За допомогою *номінальної шкали* безліч наслідків поділяють на підмножини, такі, як коло, овал чи прямокутник, області з гладкою чи нерівною границею та ін. Такі шкали застосовують для найпростіших тимчасових вирішень, коли не ставиться мета досягти оптимального вирішення, а потрібно знайти лише прийнятне. Ця шкала часто складається тільки з двох градацій.

Іноді номінальну шкалу називають шкалою найменувань чи класифікаційною.

*Шкали упорядкованості* встановлюють між підмножинами, на які розбивають безліч результатів вирішення, визначені жорсткі співвідношення. Ці співвідношення формулюють у формі *аксіом лінійності чи повної упорядкованості, транзитивності і рефлексивності*. Відповідно до аксіом лінійності про два будь-які результати можна зробити такі висновки: 1)  $e_1$  не гірше, ніж  $e_2$ ; 2)  $e_2$  не гірше, ніж  $e_1$ ; 3)  $e_1$  і  $e_2$  рівноцінні. Аксіоми транзитивності і рефлексивності розглянуто нижче.

Шкали впорядкованості достатні для прийняття вирішення у задачах з однозначними параметрами.

У структурі шкал упорядкованості виділяють шкали простого порядку, слабого порядку, часткового порядку.

**Інтервальні шкали** встановлюють, чи є різниця в корисностях  $e_1 - e_2$  однаковою, більшою чи меншою, ніж різниця  $e_2 - e_3$ . Співвідношення між різницями корисностей зберігаються, коли різницю множать на будь-яку константу чи складають з нею. Назва "шкала інтервалів" підкреслює, що в ній тільки інтервали мають сенс дійсних чисел і тільки над інтервалами слід виконувати арифметичні операції. Якщо зробити арифметичні операції над самими відліками на шкалі, забувши про їхню відносність, тоді є ризик одержати безглузді результати.

Якщо потрібно порівнювати відношення корисностей, тоді останні потрібно вимірювати у **масштабній шкалі**. Ці шкали говорять про рівність або розходження сум чи добутків розглянутих величин. Шкали довжини, маси та ін. є масштабними.

Універсальною і єдиною у смислі можливостей перетворень показань на цій шкалі є **абсолютна шкала**. Вона має й абсолютний нуль, й абсолютну одиницю. Важливою особливістю абсолютної шкали є абстрагованість (безрозмірність) і абсолютність її одиниці. Саме такі якості є і у числової осі. Числова вісь дозволяє робити над своїми показниками такі операції, що недопустимі для показників інших шкал, – уживати ці показники як показник ступеня чи аргументу логарифма.

### 3.3. Класичні критерії прийняття вирішення

Класичними критеріями прийняття вирішення є: **мінімаксний критерій (ММ-критерій)**; **критерій Байєса-Лапласа (ВЛ-критерій)**; **критерій Севіджа (S-критерій)**.

У **мінімаксному критерії (ММ)** використовують песимістичну оцінну функцію

$$Z_{MM} = \max_i e_{ir} \quad \text{і} \quad e_{ir} = \min_j e_{ij}.$$

Безліч оптимальних варіантів вирішення будується відповідно до співвідношення

$$E_o = \{ E_{io} \mid E_{io} \in E \mid e_{io} = \max_i \min_j e_{ij} \}.$$

Правило вибору вирішення відповідно з **ММ-критерієм** формулюють так: матриця вирішень  $\|e_{ij}\|$  доповнюється ще одним стовпцем з найменших результа-

тів  $e_{ir}$  кожного рядка. Вибрати слід ті варіанти  $E_{io}$ , у рядках яких стоять найбільші значення  $e_{ir}$  цього стовпця.

Застосування **ММ-критерію** виправдано в ситуаціях, коли про можливість появи зовнішніх умов  $F_j$  нічого не відомо; коли вирішення реалізується лише один раз; коли необхідно виключити який би то ні було ризик, тобто ні при яких умовах не допускається одержувати результат менший, ніж  $\max e_{ir}$ .

Тут

$$e_{ir} = \min_j e_{ij}.$$

**Критерій Байєса-Лапласа (BL)** враховує ймовірність  $q_j$  появи зовнішньої умови  $F_j$ . Тому для **BL-критерію**

$$Z_{BL} = \max_i e_{ir},$$

$$e_{ir} = \sum_{j=1}^n e_{ij} q_j,$$

$$E_o = \{ E_{io} \mid E_{io} \in E \mid e_{io} = \max_i \sum_{j=1}^n e_{ij} q_j \wedge \sum_{j=1}^n q_j = 1 \}.$$

Тут  $Z_{BL}$  - оцінна функція **BL-критерію**.

Правило вибору формулюють так: матриця вирішень  $\|e_{ij}\|$  доповнюється ще одним стовпцем, що містить математичне очікування значень кожного з рядків. Вибирають ті варіанти  $E_{io}$ , у рядках яких стоїть найбільше значення  $e_{ir}$  цього стовпця.

Припускають, що ситуація прийняття вирішення характеризується такими обставинами:

- імовірності появи умов  $F_j$  відомі і не залежать від часу;
- вирішення реалізуються (теоретично) нескінченно багато разів;
- для малого числа реалізацій вирішень допускають деякий ризик.

**Критерій Севіджа (S)** використовує позицію відносного песимізму. За допомогою позначень

$$a_{ij} = \max_i e_{ij} - e_{ij}$$

$$e_{ir} = \max_j a_{ij} = \max_j (\max_I e_{ij} - e_{ij})$$

формують оцінну функцію Севіджа

$$Z_s = \min_i e_{ir} = \min_i [\max_j (\max_I e_{ij} - e_{ij})]$$

і будують безліч оптимальних варіантів вирішення

$$E_o = \{ E_{io} \mid E_{io} \in E \wedge e_{io} = \min_i e_{ir} \}.$$

Правило вибору відповідно до критерію Севіджа формулюють так: кожен елемент матриці вирішень  $\|e_{ij}\|$  віднімається з найбільшого результату  $\max_i e_{ij}$  відповідного стовпця.

Різниці  $a_{ij}$  утворюють матрицю залишків  $\|a_{ij}\|$ . Ця матриця поповнюється стовпцем найбільших різностей  $e_{ir}$ . Вибирають ті варіанти  $E_{io}$ , у рядках яких стоїть найменше для цього стовпця значення.

Звичайно у процесі прийняття вирішень класичні критерії застосовують по чергово. Після цього серед декількох відібраних оптимальних варіантів вольовим чином виділяють остаточне вирішення.

### 3.4. Формування критеріїв управління

*Під управлінням розуміють виконання сукупності дій, спрямованих на підтримку і поліпшення функціонування об'єкта, яким управляють, відповідно до мети і програми управління. Управління здійснюють способом реалізації комплексу заходів, що включають політичні, соціальні адміністративні, юридичні, економічні та ін.*

Теорію управління почали розробляти в рамках кібернетики. **Кібернетика** (від грецького *kibernetike* – майстерність управління) – наука про загальні закони отримання, збереження, переробки і перетворення інформації в системах будь-якої природи.

**Управління системою вимагає забезпечити її цілеспрямоване поведіння при умовах роботи, що змінюються.** Це досягається належною організацією системи, під якою розуміють її структуру і спосіб функціонування.

Якщо організація системи однозначно визначена при її створенні, то управління нею зводиться до забезпечення розрахункових значень її перемінних при відхиленнях зовнішніх умов і параметрів системи від розрахункових. В інших випадках, коли компоненти системи і способи їхнього об'єднання вибираються залежно від класу розв'язуваних завдань (наприклад, агрегатний принцип побудови обчислювальних систем), вибір і формування структури і способу функціонування є завданнями управління.

### 3.5. Етапи процесу управління

При формуванні системи її елементи, якими управляють, поєднуються в частину, якою управляють – об'єкт управління (ОУ). Сукупність елементів, що управляють утворюють систему, яка управляє (УС). Обидві частини взаємодіють за допомогою кінцевого числа інформаційних зв'язків.

Необхідне поведження системи досягається способом управління її входами  $X$  чи незалежними від входів координатами стану  $Q$  - параметрами системи, або спільно тими й іншими.

Процес управління звичайно складається з двох тісно зв'язаних етапів.

**Перший етап** – розробка програми (планування), що визначає необхідне поведження об'єкта управління.

**Другий етап** – реалізація програми. Другий етап часто називають регулюванням, керівництвом, оперативним управлінням.

Чітке розмежування функцій планування і регулювання не завжди можливе. Чим менше об'єкт управління і динамічніше ситуація, тим тісніше переплітаються ці функції.

Управління динамічною системою, що піддається різноманітному і часто мінливому впливу зовнішнього середовища, сполучено з необхідністю залучення величезного обсягу інформації. Тому структура системи, що управляє (УС), будується за ієрархічним принципом.

У раціонально організованій ієрархічній системі, що управляє:

- кожен її рівень  $m$  здійснює управління ступенем  $(m - 1)$  й одночасно управляється рівнем  $(m + 1)$ . Усі рівні інформаційно зв'язані між собою;
- інформація, що надходить від об'єкта управління, рухається в протилежному напрямку – від нижніх рівнів до верхнього і при цьому послідовно «стискається». Найчастіше нижчий рівень управління постає перед вищим як «чорна

скринька», що інформує його тільки про результати своєї діяльності, але не про внутрішні процеси, пов'язані з її реалізацією;

– чим самостійніше функціонує кожний рівень управління, тим більшу частину інформації, що надходить, він «поглинає» і відносно меншу частину передає на наступний рівень. Самостійність кожного рівня управління в рамках компетенції і послідовне «стиснення» інформації – головні умови ефективності багаторівневого управління;

– функціонування системи управління як єдиного цілого досягається узгодженням цілей управління кожним її елементом і їхніми сукупностями з цілями, що стоять перед системою. Це значить, що ієрархія системи, яка управляє, ставляться у відповідність ієрархії цілей.

### 3.6. Завдання регулювання

Розробка програми управління, з яким би ступенем деталізації вона не виконувалась, охоплює лише основні фактори, що впливають на поведження об'єкта. Вона відображує деякі ідеалізовані умови й обмеження, пов'язані з реалізацією програми. Тому програма завжди базується на математичному трактуванні зв'язків між показниками. Без цього їхній попередній розрахунок узагалі неможливий.

У регулюванні приходиться враховувати нескінченну безліч факторів і зв'язків між ними. Іноді неможливо заздалегідь оцінити кожний з них і математичне трактування зв'язків між ними. Тому вирішальне значення в регулюванні здобуває принцип розробки впливу, що управляє, по відхиленню фактичного значення величини, якою управляють, від її необхідного (розрахункового) значення незалежно від причин, що викликали зазначене відхилення.

Практичну реалізацію даного принципу здійснюють за допомогою зворотного зв'язку (як правило, негативного).

Розрізняють три типи основних завдань регулювання: **стабілізація, програмне регулювання і спостереження**.

Мета **стабілізації** – підтримування заданого постійного значення вихідної величини об'єкта регулювання. Стабілізація здійснюється за допомогою регулятора (наприклад, регулятор Утга).

**Програмне регулювання** забезпечує зміну вихідної перемінної об'єкта управління відповідно до заданої програми. Зміна вихідної перемінної може бути задана у вигляді функції часу або іншого аргументу, наприклад, інтенсивності входу об'єкта. Завданням системи регулювання є в даному випадку реалізація цієї

програми при наявності тих чи інших перешкод. Характерно, що стабілізація є частковим випадком програмного регулювання.

**Спостереження** відрізняється тим, що програма не розраховується заздалегідь, а визначається поведженням об'єкта, який спостерігають. Прикладом може служити автоматичне підстроювання радіоприймача, що стежить за обраною хвилею.

Наявності зворотного зв'язку не завжди досить для забезпечення стійкості управління. Запізнювання, інерція системи, приховані нелінійності та ін. не можуть бути належним чином враховані при виборі параметрів зворотного зв'язку. Недостатність апріорної інформації про їхні фактичні значення приводить до того, що ефективний у деяких умовах зворотний зв'язок не може бути реалізований і стійкість не може бути забезпечена. Тоді найефективнішим стає регулювання, при якому регулятору надаються властивості **приспосовання (адаптації)** до характеристик середовища, що змінюються, і самого об'єкта управління. Програма для такого регулятора формується у вигляді мети управління й обмежень на перемінні і параметри, а її уточнення і коригування здійснюється самим регулятором за допомогою широко розвинутих зворотних зв'язків.

Адаптація поклала початок створенню штучних систем, які мають властивості пристосовання до середовища. Таке пристосовання досягається через навчання. *Під навчанням розуміють накопичення інформації про хід процесу регулювання в минулому і її використання для удосконалювання цього процесу на основі деякого набору правил і стимулювання поведження системи.*

Власне кажучи, при адаптації змінюється співвідношення програмного (що завдає) блоку і регулятора в системах управління. Частина роботи з формування програми переміщується в регулятор, а адаптація самого блоку, що завдає, складається у зміні цілей і обмежень на перемінні і параметри регулятора.

Іноді системи, що мають і програмний блок і регулятор, називають **системами, що самоорганізуються**. У їхньому складі виділяють системи, що самонавчаються, що самоорганізуються і самоудосконалюються. Різниця цих систем полягає у способі пристосовання до середовища.

Система регулювання залежно від її організації і використаних технічних засобів функціонує як «чисто людська» чи в умовах автоматичної системи управління (АСУ) як «людино-машинна». В іншому випадку за людиною залишаються лише функції прийняття рішень.

## ТЕМА 4. ЗАКОНИ УПРАВЛІННЯ

### 4.1. Умови повної керованості й спостережності

Поняття керованості й спостережності специфічні для методу *простору станів*. При класичному описанні динамічних систем у термінах *вхід – вихід* проблема керованості й спостережності не виникає.

При використанні методу *простору станів* не втрачається цілісна картина об'єкта. При записі рівняння стану передбачається, що в об'єкті можуть відбуватися інші процеси й існувати перемінні, не доступні для спостереження чи ті, що не піддаються управлінню.

Розглянемо проблему керованості й спостережності на якісному прикладі, запропонованому Дж. Медич.

Нехай динамічна система описується вектором стану  $Q$ , вектором входів  $X$  і вектором виходів  $Y$ . Схема системи подана на рис. 13, де  $Y$  - вектор, компонентами якого є перші  $k$  компоненти вектора стану,  $q_1, q_2, \dots, q_k$ . Зі структури системи ясно, що значення інших компонентів вектора стану ( $q_{k+1}, q_{k+2}, \dots, q_m$ ) не можна визначити на основі наявних відомостей про вихідний вектор  $Y$ , тому що ці перемінні не впливають на  $q_1, q_2, \dots, q_k$  і не включені до складу вектора,  $Y$ , який спостерігають. Отже, система не є тією, що спостерігається. Але якщо  $X$  впливає на всі перемінні стани  $Q$ , система є керованою.

Аналогічно система, показана на рис. 13, буде тією, що спостерігається, але не керованою, тому що сигнал  $X$  впливає тільки на перемінні  $q_1, q_2, \dots, q_k$ , а на перемінні  $q_{k+1}, q_{k+2}, \dots, q_m$  ззовні впливати не можна.

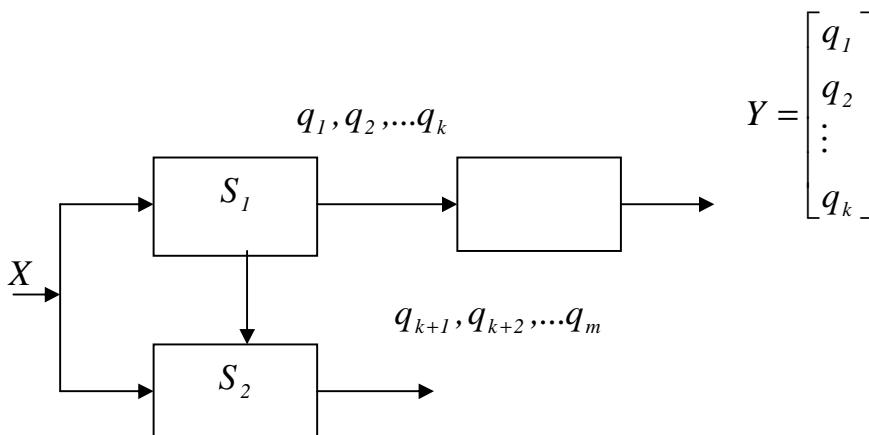


Рис. 13 – Схема системи, що не спостерігається, але керована



Враховуючи викладене, всі системи можна розділити на такі чотири категорії: що спостерігаються і керовані; що спостерігаються але некеровані; що не спостерігаються, але керовані; що не спостерігаються і некеровані.

Поняття керованості й спостережності мають принципове значення при дослідженні систем будь-якої природи. Неврахування некерованості і неспостережності може привести до помилкових висновків.

Умови керованості й спостережності можна зв'язати з видом матриць, що описують систему. Для прикладу розглянемо, при яких умовах може виникнути неспостережність чи некерованість у найпростішому випадку, коли матриця  $A$  діагональна, тобто  $A = \text{diag } a_{ii}$ .

Нехай система має вигляд, показаний на рис. 14, де  $Q$  і  $Y$  - вектори розмірності 2,  $X$  - вектор розмірності 3.

$$Y = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_k \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_m \end{bmatrix}$$

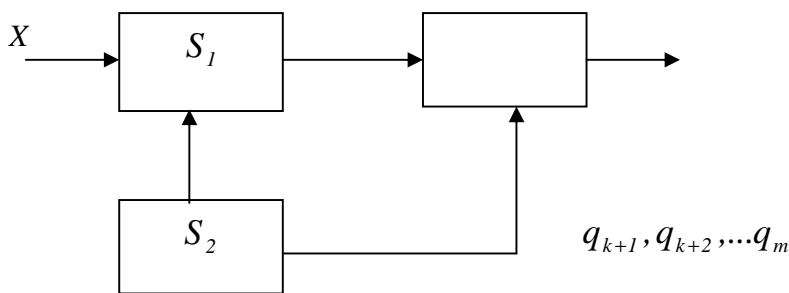


Рис. 14 – Схема системи, що спостерігається, але некерована

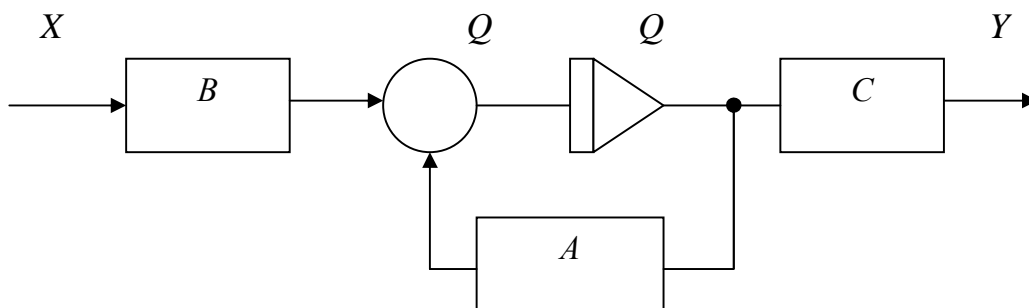


Рис. 15 – Схема системи

Управління системи в матричному вигляді записується так:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= A_{(2 \times 2)} Q + B_{(2 \times 3)} X; \\ Y &= C_{(2 \times 2)} Q + D_{(2 \times 3)} X,\end{aligned}$$

де

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}; \quad D = 0.$$

Якщо один з рядків у матриці  $B$  (наприклад, перший) складається повністю з нульових елементів, тоді відповідна координата (перша) буде некерованою, тому що жодна з трьох керуючих дій не чинить керуючого впливу на  $q_1$ .

Аналогічно, якщо один з двох стовпців матриці  $C$  складається з нульових елементів, то відповідна координата вектора стану не вчинить впливу ні на один із двох сигналів, що спостерігаються, -  $y_1$  і  $y_2$ . Її поводження ніяк не буде виявлятися зовні, координата неспостережна.

Таким чином, для системи найпростішого вигляду з діагональною матрицею  $A$  можна було б зв'язати умови керованості й спостережності з виглядом матриць  $B$  і  $C$ : *керованість означає відсутність нульового рядка у  $B$ , спостережність – відсутність нульового стовпця у  $C$ .*

У загальному випадку матриця  $A$  недіагональна, а самі перемінні стану можуть впливати один на другий. Тому навіть якщо немає безпосереднього впливу управління на дану координату стану  $q$ , такий вплив може виникнути більш складним чином: управління  $X$  впливає на якусь іншу координату, а вже ця координата через матрицю  $A$  впливає на дану координату. У такому випадку роль матриці  $B$  відіграє добуток матриць  $AB$ . Якщо й у цьому випадку впливу  $X$  на координату  $q_i$  немає, тоді може виявитися, що такий вплив здійснюється ще більш опосередкованим чином – через матрицю  $A(AB) = A^2B$  та ін.

Тоді умову повної керованості можна записати так: *система є цілком керованою, якщо ранг матриці  $[B, AB, A^2B, \dots, A^{m-1}B]$  дорівнює  $m$ .*

Рангом матриці називають максимальний розмір її мінорів, відмінних від нуля. Мінор  $k$ -того порядку матриці розмірністю  $(m \cdot l)$  виходить викреслюванням будь-яких  $(m - k)$  рядків і  $(l - k)$  стовпців матриці.

Аналогічна їй умова спостережності системи. Система цілком спостережена, якщо ранг матриці  $\begin{bmatrix} C^T & A^T C^T & A^T A^T C^T & \dots & A^{T^{m-1}} C^T \end{bmatrix}$  дорівнює  $m$  (тут індекс  $T$  означає транспонування).

#### 4.2. Показники якості управління. Інтегральні показники якості що використовують для оцінки процесу управління

Різноманітний характер процесу управління вимагає вибрати такий варіант, що забезпечує максимальну ефективність управління, досягнення мети найкращим способом. Це завдання стає розв'язним лише тоді, коли існує кількісна характеристика, що дозволяє об'єктивно зіставити результати управління. Таку характеристику називають *показником* якості чи ефективності управління. Вибір показника якості управління диктується призначенням системи, метою й умовами її функціонування і розвитку. Звичайно він задається як функція чи функціонал вхідних (вихідних) перемінних, параметрів об'єктів управління, часу. Таку функцію часто називають *цільовою*, тому що вона дає кількісну міру мети управління.

При конструюванні об'єктів управління в техніці показники якості функціонування майбутніх систем можуть використовуватись з метою надання об'єкту управління визначених конструктивних характеристик. Це означає, що структуру об'єкта підбирають під деякий оптимальний режим функціонування системи в цілому. У цих випадках намагаються створити конструкцію, адекватну функції, що виконується. Надалі конструкція об'єкта управління не змінюється.

Біологічні системи управління у процесі еволюції змінювались і за структурою, і за функціями. У процесі еволюції виробилась єдність структури і функції всіх частин біологічних систем управління. Тому якщо при розгляді показників функціонування біологічних систем можна використовувати результати, отримані в теорії автоматичного управління, тоді при оцінці якості структури можна спиратись лише на загальні положення, вироблені біологією.

**Формальні показники якості** – сукупність прийнятих чи постульованих кількісних характеристик, що дозволяють оцінити якість роботи системи.

Для оцінки якості найчастіше використовують інтегральний показник

$$I = \int_0^T f(x) dt,$$

де  $f(x)$  - функція змінних, що характеризують стан системи.

З цього похибка залежно від вигляду функції  $f(x)$  можна отримати оцінки для різних окремих випадків. Якщо  $f(x) = 1$ , тоді інтегральний показник оцінює час перехідного процесу:

$$I = \int_0^T dt.$$

Якщо  $f(x) = x(t)$  - погіршеність перехідного процесу в системі управління чи  $f(x) = |x(t)|$ , тоді інтегральні показники оцінюють відхилення реального перехідного процесу від бажаного на всьому інтервалі часу управління:

$$I = \int_0^T x(t) dt,$$
$$I = \int_0^T |x(t)| dt.$$

Якщо  $f(x) = x^2(t)$ , тоді інтегральний показник оцінює якість перехідного процесу незалежно від знака:

$$I = \int_0^T x^2(t) dt.$$

Цей показник називають квадратичною похибкою. При дії в системі управління випадкових збуджень розповсюдженим показником якості є середня квадратична похибка, яка є характеристикою розсіювання можливих значень випадкової величини щодо їхнього середнього значення.

Поряд з цими оцінками при синтезі систем з випадковими впливами використовують питомий ризик, загальний ризик та ін.

### 4.3. Сутність оптимального управління. Надійність системи управління. Показники надійності

Звичайно при побудові системи автоматичного управління ставиться завдання мінімізації розглянутих інтегральних показників. Мінімум цих показників розглядають як ознаку (критерій) оптимальності системи управління. Як критерії оптимальності може використовуватися швидкодія системи, маса, витрати енергії, коефіцієнт корисної дії та ін.

Задача *оптимального управління* формулюється таким чином: задано об'єкт, координати якого описуються  $n$ -мірним вектором  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ .

Координати об'єкта змінюються в часі за законом

$$\dot{x}_i = f_i(x, u), \quad i = 1, \dots, n,$$

де  $f_i(x, u)$  - функція  $x$  і  $r$ -мірного вектора управління  $u = \{u_1, \dots, u_r\}$ .

Вектор  $x$  характеризує положення об'єкта у фазовому просторі і називається вектором фазових координат.

Необхідно вибрати управління, для якого значення функціонала

$$I = \int_{t_0}^{t_1} f_0(x(t), u(t)) dt.$$

Управління і траєкторію, що відповідають вирішенню цієї задачі, називають відповідно оптимальним управлінням і оптимальною траєкторією.

Не менш важливим показником функціонування системи управління є її *надійність*. Під *надійністю систем управління* розуміють їхню здатність зберігати найбільш суттєві властивості на заданому рівні протягом визначеного проміжку часу і за певних умов функціонування. Ступінь надійності системи визначають показниками, пов'язаними з явищем відмови. Відмова – подія, що полягає в порушенні працездатності. Відмови поділяють на поступові й раптові. Поступові відмови проявляються у вигляді поступового виходу параметрів системи за межі встановлених допусків, раптові – у вигляді різкої зміни параметрів, що визначають якість системи.

Показниками надійності є: ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмовлень, середній час безвідмовної роботи.

Необхідність зрівноважування розмаїтості системи, що управляє, й об'єкта управління оцінюється за допомогою показників *адекватності* за складністю і за рівнем відносної організації.

При встановленні адекватності за складністю між системою, що управляє, й об'єктом управління здійснюється мінімізація функціоналу:

$$I = \int_0^T f(H_m) dt,$$

де  $[0, T]$  - інтервал розвитку системи управління;  $H_m$  - складність.

Складність для об'єкта управління  $H_m^0$  і системи управління  $H_m^S$  визначається так:

$$H_m^0 = \log n_0; \quad H_m^S = \log n_s,$$

де  $n_0$  і  $n_s$  - число станів об'єкта і системи управління.

У цьому випадку

$$I = \int_0^T (\log n_0 - \log n_s)^2 dt.$$

Функціональне пристосування системи, що управляє, до об'єкта управління може характеризуватись аналогічним функціоналом, який беруть за рівнем відносної організації

$$\min I = \min \int_0^T \left[ \frac{H^S}{H_m^S} - \frac{H^0}{H_m^0} \right]^2 dt,$$

де

$$H^0 = \sum_{i=1}^{n_0} P_i^0 \log P_i^0; \quad H^S = \sum_{i=1}^{n_s} P_i^S \log P_i^S;$$

$P_i^0$ ,  $P_i^S$  - імовірності прийняття об'єктом і системою управління  $i$ -того стану.

Для біологічних систем, що еволюціонують, визначити складність і відносну організацію не завжди можливо. Тому, спостерігаючи тільки за системою управління, можна розглядати інтегральний показник, використовуючи принцип *самоорганізації*:

$$I = \int_0^T \frac{\Delta H_k^Q}{\Delta H^Q} \varphi(Q) dQ,$$

де  $\Delta H_k^Q$  - зміна невизначеності контрольних послідовностей;  $\Delta H^Q$  - зміна невизначеності функціонування біологічної системи управління;  $\varphi(Q)$  - деяка функція послідовностей;  $Q$  - набір послідовностей, що навчають.

Конкретний вигляд підінтегрального вираження невідомий і можна говорити, що для самоорганізації біологічної системи управління необхідно, щоб даний функціонал досягав свого максимального значення за мінімальний час і з мінімальною витратою речовини й енергії.

## ТЕМА 5. УПРАВЛІННЯ ПРИ ВИПАДКОВИХ ЗБУРЕННЯХ

### 5.1. Єдність і протилежність проектування і управління. Часткове і системне управління

*Проектування* в широкому смислі – це вибір способу дій людини в процесі взаємодії із середовищем. У вузькому смислові проектування є процес створення проекту системи як логічної основи наступної діяльності людини. Об'єктом проектування є система.

*Проект* – модель системи, подана у вигляді креслень, графіків, формул, пояснювальної записки та ін. Проект є результатом розумової діяльності проектувальника в сфері інформації. Система, створена на основі проекту, – результат діяльності людей у сфері матеріальних об'єктів, тобто у сфері маси й енергії.

Ядром процесу проектування є *конструювання*. Об'єктом конструювання є конструкція. *Конструкція* – комплекс структур і станів системи.

Якщо проектування, кінець кінцем, зводиться до обґрунтування необхідності створення системи і її розрахункових характеристик, тоді конструювання – процес підбору необхідних конструктивних характеристик, що визначають логічну основу конструкції. Наприклад, якщо на етапі проектування автомобільної дороги обґрунтовують необхідну міцність конструкції дорожнього одягу, тоді на етапі конструювання дорожнього одягу підбирають такі її конструктивні характеристики, які забезпечують її необхідну (задану) міцність. Конструкція, також як і проект, є моделлю системи і протиставляється конкретності.

Прийняття рішень у проектуванні базується на критеріях соціальної адекватності. Конструювання виходить з техніко-економічних критеріїв.

Розрізняють часткове й системне проектування.

*Часткове проектування* – проектування частини цілого без урахування властивостей цілого. Часткове проектування найчастіше ґрунтується на суб'єктивно прийнятих критеріях.

*Системне (інтегральне) проектування* – проектування частини цілого з точки зору цілого (надсистеми).

Системне проектування включає такі етапи:

- 1) устанавлення цілого;
- 2) визначення зв'язків між частиною і цілим;
- 3) устанавлення вимог, що пред'являє ціле до його частин;
- 4) оптимізація частин цілого за системними вимогами.



Проблема частини і цілого має важливе значення. Поняття частина і ціле відносні. Для натураліста абсолютну цілісність має космос. Але із практичних позицій абсурдно для кожної технічної задачі визначати властивості космосу та їхні відносини до того, що повинно складати вирішення виниклої задачі.. Проте суттєві цілісності можуть мати великі розміри.

Як критерій вичленовування частини з цілого можна використовувати специфічну особливість матеріальних комплексів – *здатність бути елементом*. Тут під елементом будемо розуміти надалі неподільну частину системи, що може брати участь у різних системах без зміни своїх властивостей. Здатність бути елементом реалізується у тим більшому ступені, чим менше зв'язків існує між елементом і складним комплексом.

Виділення частини з цілого може ґрунтуватися на розходженні *підсистем* з відповідним числом зовнішніх зв'язків і при бажаному числі внутрішніх зв'язків, тому що очевидно, чим менше число зовнішніх зв'язків (між підсистемами), тим у меншому ступені зміни в одній з підсистем впливають на зміни в інших підсистемах.

Важливим моментом у проектуванні систем є визначення *області відносної цілісності*. Цю область часто називають областю значущої взаємодії (рис. 16).

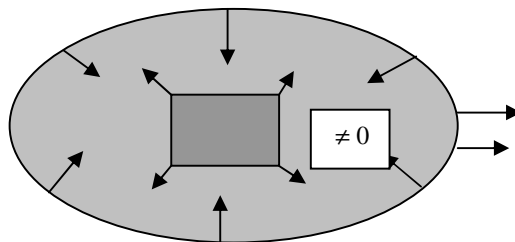


Рис. 16 – Модель задачі визначення відносної цілісності

На рис. 16 еліпс утворює границю області відносної цілісності. Прямокутник позначає об'єкт проектування. Стрілки характеризують взаємні впливи розглянутого об'єкта та інших систем.

Практично область відносної цілісності визначають на основі таких правил:

- границя області повинна охоплювати ті елементи, вплив яких на проєктований об'єкт не дорівнює нулю;
- поза цією областю значення дії проєктованого об'єкта має прагнути до нуля.

Основними елементами проектування і конструювання, як науки про технічну творчість є:

- теорія технічних систем;

- методологія проектування;
- методологія конструювання;
- теорія запису конструкції;
- методологія дослідно-конструкторських робіт і системних досліджень;
- нормалізація конструкцій.

*Теорія технічних систем і теорія конструювання* сприяють раціональному розумінню суттєвих властивостей технічних засобів і тих виробів, що мають стати цими засобами.

*Методологія проектування і методологія конструювання* включають:

- описання творчої діяльності з виділенням процедур, з яких складаються проектування і конструювання;
- методи творчої діяльності чи їхньої основи.

*Теорія запису конструкції* – система знань про загальні закони й принципи запису конструктивного вигляду і комплексу розмірів конструкції. Те, що звичайно іменують *кресленням*, складає тільки один із способів запису.

Конструктивний вигляд – це якісна властивість конструкції. Комплекс розмірів – спосіб визначення кількісних властивостей конструкції.

*Методологія дослідно-конструкторських робіт* у взаємозв'язку із системними дослідженнями дає уявлення про способи побудови конструкцій і порядок їхнього застосування на кожному етапі конструювання.

Під *нормалізацією* в системному проектуванні розуміють обмеження різноманіття. Частковим випадком нормалізації є *стандартизація*. Нормалізація дає такий ефект:

- поліпшення комунікативності;
- збільшення можливості заміни деталей машин за рахунок їхньої стандартизації;
- зниження матеріальних і операційних витрат;
- спеціалізація виробництва;
- оптимальна концентрація виробництва.

Похідними від нормалізації є *уніфікація* і *типізація*.

*Уніфікація* заснована на обмеженні й упорядкуванні. Із сукупностей випадкових величин створюють обмежені й упорядковані набори (комплекси) величин меншої чисельності.

*Типізація* іде за уніфікацією і пов'язана з уведенням конструктивних властивостей в уніфікований комплекс величин, що стають при цьому конструктивними

характеристиками. Такими властивостями можуть бути системні властивості, наприклад, передатні відносини.

## **5.2. Методологія управління. Визначення евристичного, алгоритмічного і систематичного методів управління**

**Методологія** в широкому сенсі – це навчання про методи й способи їхнього застосування при вирішенні різних задач. **Метод** – раціональна основа способу дії.

Для існування методу необхідні:

- правила (принципи) поведінки як описання способу дії;
- усвідомлення використання методу як основи дії;
- дисципліноване підпорядкування правилам поведінки;
- описання ситуації, в якій доцільне застосування даного методу.

Таким чином, метод являє собою систему відтвореного способу дії при усвідомленому використанні правил поведінки для найбільш імовірного досягнення наміченої мети в даних обставинах. У практиці проектування і конструювання використовують такі методи: евристичний; алгоритмічний; систематичний.

**Евристичний метод** базується на використанні інтуїції проектувальника, загальних правил і рекомендацій. Даний метод характеризується тим, що побудову задовільного проекту розглядають не як вибір з безлічі проектів, а як вдалий вибір з альтернативних вирішень на кожному кроці проектування. У рамках евристичного методу не ставиться запитання про оптимальний проект, а лише про досить гарний.

**Алгоритмічний метод** базується на послідовностях вказівок, що стосуються процедур (операцій), які дозволяють вирішити проектне чи конструкторське завдання. Такі вказівки називають алгоритмами. Наявність твердих алгоритмів дозволяє широко використовувати обчислювальну техніку і засоби прикладної математики. Проблема оптимізації формулюється як проблема вирішення екстремальних завдань. Застосування алгоритмічного методу обмежено завданнями конструювання.

**Систематичний метод** аналогічний методу послідовного поліпшення вирішень чи послідовного скорочення нев'язань у математичному програмуванні. Але відсутність безлічі всіх можливих проектів для здійснення вибору не дозволяє отримати оптимальне рішення. Тому перехід від одного вирішення до іншого, кращого, замінюють перетворенням вихідного проекту. Таким чином, у початко-

вому пункті систематичного методу є не область можливих проектів, а один чи кілька початкових проектів.

Оптимальність у разі застосування систематичного методу носить відносний характер. Оптимальним вважають всякий допустимий проект, що є найкращим з усіх проектів, які є до моменту завершення проектування. При цьому, коли ми говоримо "найкращий", ми маємо на увазі не відповідність проекту деякому оптимуму, а відсутність недоліків, виявлених в інших проектах (із збереженням їхніх переваг).

Коли початковий проект виявляється недопустимим, його перетворюють, що робить його допустимим. Для цього здійснюють аналіз проектувальних процедур. У процесі аналізу виявляють помилки, що стали причиною недопустимості початкового проекту. Потім формують методичні принципи, що дозволять надалі уникнути помилок і одержати допустимий проект. Ці принципи вносять у бібліотеку принципів. Отримані принципи використовують для поліпшення початкового проекту. Усі названі операції повторюють, доки не буде отриманий допустимий проект.

На кожному кроці поліпшення проекту реалізують кілька напрямків поліпшення. Можливий рух за одним з них веде у безвихідь. Тоді виникає необхідність повернення до одного з проміжних варіантів, і тому необхідно зберігати всі проміжні варіанти. Інший спосіб – одночасний рух за всіма можливими напрямками. Рух за кожному з напрямків вимагає контролю здійсненності проекту в технологічному і фінансовому планах, а також можливостей і способів ліквідації створеної системи після закінчення терміну її служби.

У структурі правил проектування і конструювання можна виділити дві групи принципів: *методологічні* й *методичні*.

**Методологічні принципи** спрямовані на підвищення ефективності дій проектувальника при досягненні поставленої мети. Ці принципи часто називають *праксеологічними*. *Праксеологія* – наука про ефективність дій.

До методологічних принципів відносять: принцип максимізації математичного очікування; принцип субоптимізації; принцип явищ з малою ймовірністю; принцип усунення слабких ланок; принцип максимізації довгострокової ефективності; принцип централізації; принцип здійсненності проекту.

*Принцип максимізації математичного очікування* стверджує, що при створенні систем необхідно досліджувати відношення «вартість/ефективність» і в процесі дослідження прагнути максимізувати ефективність системи (чи її математичне очікування) при фіксованій вартості чи мінімізувати вартість при фіксованому значенні ефективності.

*Принцип субоптимізації* означає, що незалежна оптимізація кожного з елементів системи в загальному випадку не приводить до оптимізації системи в цілому. Наприклад, при проектуванні автомобільних доріг розширення проїзної частини дороги без відповідного забезпечення видимості і розширення мостів може не поліпшити умови руху, а навпаки погіршити їх і привести до зростання дорожньо-транспортних пригод. Тому система повинна оптимізуватись за системними критеріями. У результаті за рахунок компромісів усередині системи її елементи можуть виявитися не оптимальними, але система в цілому буде оптимальною.

*Принцип явищ з малою ймовірністю* говорить, що основне завдання системи не повинно переглядатись, а основні характеристики системи не повинні значно змінюватись, для того щоб система виявилась придатною також у ситуаціях, що мають малу ймовірність. Наприклад, проектування снігозахисту автомобільної дороги повинно вестись не на максимально можливий обсяг снігоприносу до дороги з повторністю 1 раз у 300 – 400 років, а на оптимальний обсяг, що забезпечує мінімум сумарних витрат на снігоочищення проїзної частини дороги, на посадку пришляхових снігозахисних лісонасаджень і догляд за ними.

*Принцип усунення слабких ланок* стверджує, що резерв підвищення ефективності системи слід шукати в її слабкій ланці. Так, якщо на автомобільній дорозі є міст з вузькою проїзною частиною, тоді підвищення пропускної здатності дороги в цілому виявляється можливим після розширення моста.

*Принцип максимізації довгострокової ефективності* означає, що оптимізація системи має вестись за критерієм ефективності, розрахованому за весь термін її служби, а не для окремих моментів часу.

*Принцип централізації* вимагає централізації керівництва і прийняття рішень. Іншими словами, він вимагає централізації інформації, не вимагаючи при цьому централізації фізичних пристроїв.

*Принцип здійсненності проекту.* Технологічні й фінансові можливості суспільства мають забезпечувати реалізацію вимог до системи.

**Методичні принципи** – це правила, що відображують приватні закономірності проектування. Методичні принципи містять вказівки на деяку процедуру проектування, на безліч моментів процедури, що дозволяють одержувати якісний проект.

До основних методичних принципів відносять: принцип автономності; принцип найменшої взаємодії; принцип взаємодоповнення; принцип забезпечення динамічної достатності; принцип ієрархії у задоволенні вимог; принцип узгодження норм і цілей функціонування елементів і системи в цілому; принцип динамічної рівноваги.

*Принцип автономності* стверджує, що компоненти системи мають функціонувати автономно. Залежність функціонування одних компонентів системи від інших має бути мінімізована. Цей принцип широко використовують у практиці організації дорожнього руху. Наприклад, для виключення впливу тихохідних автомобілів на швидкохідні виділяють смуги руху під вантажні і легкові автомобілі, будують транспортні розв'язки у різних рівнях та ін.

*Принцип найменшої взаємодії* означає, що взаємодія між системою і середовищем має бути мінімізована. Це дозволить при найменшій дії одержати найбільший ефект.

*Принцип взаємодоповнення (синергетизму)* встановлює, що компоненти системи повинні взаємно компенсувати недоліки кожного з них. Між компонентами системи мають формуватись синергетичні відносини, що передбачають взаємодопомогу в процесі вирішення поставлених завдань.

*Принцип забезпечення динамічної достатності.* Умови функціонування системи та її компонентів повинні забезпечувати підтримку керованих змінних функціонування у допустимих межах. У протилежному випадку система утратить властивість пристосовності до умов функціонування.

*Принцип ієрархії у задоволенні вимог.* Для отримання якісних проектів необхідно послідовне задоволення вимог у порядку їхньої важливості (ієрархії). Відносна важливість вимог має встановлюватись на основі змістовного аналізу функціонування системи.

*Принцип узгодження норм і цілей функціонування елементів і системи в цілому.* Відповідно до цього принципу характер пропонованих середовищем чи закладених у середовище цілей повинен збігатися з індивідуальними нормами поведіння системи. Цілі функціонування системи і середовища мають бути несуперечливими.

*Принцип динамічної рівноваги* – забезпечення рухливої рівноваги між системою і середовищем, а також між окремими компонентами системи. Для людино-машинних систем цей принцип трансформується у принцип забезпечення рухливої рівноваги між внутрішніми (психічні процеси, стани і властивості) і зовнішніми (знаряддя праці) засобами діяльності людини.

Найважливішими **принципами конструювання** є: принцип оптимального навантаження; принцип оптимального матеріалу; принцип оптимальної стабільності; принцип оптимальних співвідношень взаємозалежних величин.

*Принцип оптимального навантаження* стверджує, що навантаження тим менше відрізняється від оптимального, чим більше конструкція системи відповідає обраним критеріям. Іншими словами, оптимізація навантаження веде до оптимізації конструкції.

Оптимізація навантаження можлива при:

- 1) рівномірному розподілі навантажень чи напружень;
- 2) збільшенні числа способів передачі навантажень;
- 3) зменшенні можливостей появи ударних навантажень;
- 4) зменшенні енергетичних утрат.

*Принцип оптимального матеріалу.* Витрати матеріалу тим менше відрізняються від оптимальних, чим більше конструкція системи відповідає оптимальному комплексу критеріїв.

Оптимізація матеріалу здійснюється, виходячи з часткових критеріїв, що характеризують:

- доступність (можливість одержання) матеріалу;
- виробничі обмеження і пріоритети;
- механічні властивості, що обумовлюють можливість сприйняття навантажень;
- можливість обробки матеріалу;
- особливості відкритих поверхонь (тертя, прилипання, зчеплення);
- чутливість до впливу зовнішніх факторів (корозійна стійкість, жароміцність, розчинність та ін.);
- фізичні параметри (питома вага, питома теплоємність, теплове розширення, тепло- і електропровідність та ін.);
- магнітні властивості;
- радіоактивні властивості;
- формостійкість.

*Принцип оптимальної стабільності.* Стабільність системи тим менше відрізняється від оптимальної, чим більше конструкція відповідає критеріям надійності.

Надійність системи виражає статистичні відносини між критичними навантаженнями для компонентів системи.

*Принцип оптимальних співвідношень взаємозалежних величин.* Відносини між конструктивними характеристиками, а також іншими характеристиками системи тим менше відрізняються від оптимальних, чим більше конструкція відповідає прийнятим критеріям. Серед взаємозалежних величин на особливу увагу заслуговують:

- конструктивні геометричні характеристики;
- стереомеханічні властивості;
- динамічні характеристики;
- кінематичні властивості;
- пружні властивості;
- маса.

## ТЕМА 6. ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

### 6.1. Сутність оптимального управління. Експлуатаційні характеристики систем

*Експлуатація технічної системи – це процес її використання за призначенням і підтримки в технічно справному стані.* Використання системи за призначенням включає організацію її функціонування. Підтримка системи в технічно справному стані включає технічне обслуговування (утримання), відновлення працездатності (ремонт), збереження, підготовку до роботи та ін. Забезпечення справного стану неможливе без чіткої організації, тобто без перспективного планування і управління.

Для того, щоб керувати процесом експлуатації, необхідно передбачати можливі стани системи в майбутньому. Передбачення забезпечується науковим прогнозуванням. Прогнозування включає передбачення розрахункових характеристик (вихідних даних) і поточних станів системи.

Динаміка розрахункових характеристик залежить від структурних і функціональних змін системи, її якісної еволюції.

Поточний стан системи визначається сукупністю значень її технічних характеристик. У загальному випадку можна вважати, що в процесі експлуатації технічні характеристики системи змінюються безперервно, тому і станів системи може бути нескінченна безліч. Але для організації експлуатації важливо розрізняти стани, які відповідають крайнім чи допустимим (граничним) значенням технічних характеристик. Такі крайні чи допустимі значення технічних характеристик відповідають робочому стану, відмовленню, стану технічного обслуговування, збереження, відновлення та ін. Тут під **відмовленням** розуміють подію, після якої система перестала виконувати (цілком чи частково) свої функції.

Розрізняють такі принципові схеми виникнення відмовлень: миттєвих ушкоджень; змін, що накопичуються; релаксації; дій декількох незалежних причин.

*Схема миттєвих ушкоджень* поєднує випадки, коли відмовлення системи чи її елемента викликане перевищенням навантаження на неї понад деякого допустимого значення. Таке «пікове» навантаження – явище випадкове, і відмова елемента настає незалежно від того, скільки часу до цього він знаходився в експлуатації, яким був при цьому його стан.

*Схема змін, що накопичуються*, відноситься до випадків, коли відмови утворюються внаслідок поступового старіння чи зношення. Типовими приклада-



ми таких відмов є випадки корозії залізобетонних опор, фундаментів, металевих конструкцій та ін.

*Схема релаксації* передбачає ті випадки, коли в результаті поступового накопичення пошкоджень відбувається стрибкоподібна зміна стану того чи іншого елемента або системи в цілому. Як приклад, можна навести відмови, що виникають під впливом циклічних навантажень. Тут поступове накопичення пошкоджень може бути лише непрямую причиною відмов. Накопичення пошкоджень приводить до зростання ймовірності відмовлення.

*Схема дій декількох незалежних причин* відповідає ситуації, коли одночасно діють кілька причин відмовлень.

Найважливішими експлуатаційними характеристиками системи є: надійність, працездатність, довговічність, збереженість, відновлюваність (ремонтваність), ремонтоздатність, термін служби, ресурс.

Під **надійністю** розуміють властивість системи виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного проміжку часу у визначених умовах експлуатації.

**Працездатність** – стан системи, при якому вона здатна виконувати задані функції з параметрами, встановленими вимогами технічної документації.

Властивість системи зберігати працездатність з необхідними перервами для технічного обслуговування і ремонтів до граничного стану, обговореного в технічній документації, називається **довговічністю**.

**Збереженість** називається властивість системи мати обумовлені експлуатаційні показники протягом і після термінів збереження і транспортування, встановленого в технічній документації.

**Відновлюваність** (ремонтваність) системи називається її здатність відновлювати працездатність у випадку виникнення відмови за допомогою ремонту.

**Ремонтоздатність** – властивість системи, що полягає в пристосованості до попередження, виявлення й усунення відмовлень і несправностей у процесі технічного обслуговування і проведення ремонтів.

**Ресурсом** системи називається тривалість функціонування чи обсяг роботи, виконаний системою до граничного стану, оговореного в технічній документації.

**Терміном служби** називається календарна тривалість експлуатації системи до моменту виникнення граничного стану, оговореного в технічній документації.

Розходження між ресурсом і терміном служби обумовлене тим, що ресурс враховує фактичний наробіток системи, а термін служби – сумарну тривалість як роботи, так і простою з будь-яких причин.

Одним з основних завдань, розв'язуваних у процесі експлуатації технічних систем, є забезпечення їхньої надійної роботи. В якості кількісних характеристик надійності використовують: імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмовлень, середній час безвідмовної роботи (наробіток на відмовлення), щільність розподілу часу безвідмовної роботи, характеристики і параметри потоку відмовлень та ін.

**Інтенсивність відмовлень** – це швидкість появи відмов неремонтованої системи за одиницю часу після даного моменту часу за умовою, що відмовлення до цього моменту не виникло. Інтенсивність відмов позначають латинською буквою  $\lambda$ .

**Наробіток на відмовлення** – середнє значення наробітку ремонтваної системи між відмовленнями.

Робота технічної системи в процесі експлуатації поділяється на три періоди: приробіток, нормальна експлуатація, зношення.

У період приробітку спостерігаються підвищені приробітні відмовлення, потім інтенсивність відмовлень суттєво знижується і тримається на якомусь мінімальному рівні, обумовленому ймовірністю раптових відмов. Мінімальний рівень інтенсивності відмовлень характерний для періоду нормальної експлуатації. Після закінчення цього періоду починає впливати фактор зношення, і з'являються так звані зносіві відмови, інтенсивність яких з часом монотонно наростає.

## **6.2. Діагностика станів системи. Оптимальне управління експлуатаційними процесами**

**Діагностичний процес** – це процес обробки вихідної інформації для отримання висновку про стан досліджуваної системи.

Як вихідну інформацію при вирішенні діагностичного завдання використовують симптоми відмовлення й ознаки нормального функціонування системи.

**Симптомом** відмов системи є інформація про відхилення від норм параметрів, що характеризують її працездатність чи стан, а також про зміну цих відхилень у часі. Мова йде про ті параметри, що контролюються у процесі роботи системи, у процесі її технічного обслуговування та ін. Важливе значення мають зведення про те, як, скільки, в яких умовах працювала система і при яких умовах наступило відмовлення. Якщо попередніми спостереженнями можна встановити, що параметри, які характеризують працездатність системи, наближались до границі допуску поступово, тоді це свідчить про можливість появи відмовлення, викликаного зношенням і старінням. Це змушує звертати увагу в першу чергу на елемен-

ти, найбільш піддані таким змінам. Симптом, що враховує поступову зміну параметра за часом, називають *інтегральним*.

Раптова поява відмовлення може свідчити про недотримання правил експлуатації системи чи про помилки, допущені при її виготовленні. Тоді при діагностиці стану звертають увагу насамперед на «слабкі» місця в конструкції і на можливість помилок, що допускає обслуговуючий персонал. Додатковий симптом, що враховує можливість відмовлення, називають *диференціальним*.

Часто для визначення стану системи недостатньо інформації, яка міститься в симптомах відмовлення й ознаках нормального функціонування. Тоді для отримання додаткової інформації звертаються до різних дослідів. Програми дослідів можуть бути *жорсткими* і *гнучкими*. При жорсткій програмі відшукування послідовність перевірок визначена заздалегідь і в процесі відшукування елемента, що відмовив, не змінюється. При гнучкій програмі характер (зміст) чергової перевірки встановлюється в ході діагностичного процесу, тобто вирішення про проведення наступного дослідів приймається після аналізу результатів попереднього дослідів.

Найважливішим компонентом діагностичного процесу є розпізнавання інформації, отриманої в результаті дослідів. Для досвідченого фахівця інформація більш помітна, ніж для некваліфікованого. Недосвідчений фахівець може взагалі невірно витлумачити результати дослідів і прийняти неправильне рішення. Тому велике значення мають методи навчання фахівців, їхні індивідуальні здібності, досвід експлуатації техніки та ін.

Діагностичні процеси характеризуються різною ефективністю. Оцінку ефективності здійснюють за такими критеріями: тривалістю діагностичного процесу; загальним числом дослідів (перевірок), необхідних для відшукування елемента, що відмовив; вартістю реалізації діагностичного процесу та ін. У ході розробки програм діагностичних процесів виникає завдання оптимізації за одним чи декількома критеріями. Програма, що відповідає оптимальному значенню одного чи декількох критеріїв, називається *оптимальною*.

Для деяких систем першорядне значення має підтримка їх у стані, готовому до негайного застосування за призначенням. Тоді основним критерієм оптимізації є тривалість діагностичного процесу. Процес відшукування несправного елемента оптимальний, якщо його тривалість мінімальна. Оптимальний діагностичний процес припускає негайне використання отриманої інформації, тобто проведення дослідів за гнучкою програмою.

Для одержання мінімальної тривалості діагностичного процесу необхідно на першому етапі прагнути до збільшення швидкості отримання інформації. Під швидкістю отримання інформації розуміють відношення

$$V_j = \frac{I_j}{t_j},$$

де  $V_j$  - швидкість отримання інформації на  $j$ -тому етапі дослідів;  $I_j$  - кількість інформації, отриманої на  $j$ -тому етапі дослідів;  $t_j$  - тривалість  $j$ -того етапу дослідів.

Таким чином, на першому етапі дослідів домагаються виконання умови

$$V_j \rightarrow \max,$$

де  $V_j$  - швидкість отримання інформації на першому етапі дослідів.

Враховуючи результати першого етапу, визначають другий етап пошуку. З усіх можливих варіантів дослідів вибирають той, який знову забезпечує максимальне значення швидкості отримання інформації. Аналогічно вибирають варіанти дослідів на наступних етапах. У результаті оптимальний діагностичний процес характеризується таким рядом:

$$V_{1\max}, V_{2\max}, \dots, V_{n\max},$$

де  $n$  - число етапів до виявлення елемента, що відмовив.

Отриманий ряд максимальних швидкостей одержання інформації визначає принцип діагностування за цими швидкостями.

Використання принципу максимальної швидкості отримання інформації для побудови максимального діагностичного процесу дозволяє по-різному будувати програми відшукування відмовлень. Для побудови програми можуть використовуватись: метод поелементних перевірок, метод групових перевірок, метод логічного аналізу симптомів відмовлення.

**Метод поелементних перевірок** передбачає перевірку елементів по одному у заданій послідовності. Кожна перевірка має два результати: або елемент справний, або ні. Якщо елемент, який перевіряють, виявився справним, тоді приступають до перевірки наступного елемента і так до виявлення несправного. Передбачають наявність у системі одного відмовлення.

Послідовність елементів, які перевіряють, відповідає принципу максимальної швидкості отримання інформації і залежить від коефіцієнта відмовлення  $i$ -того елемента  $\beta_i$  і середнього часу перевірки кожного елемента  $t_{cep}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ). Під коефіцієнтом відмов розуміють відношення середнього числа відмов  $i$ -того елемента за час  $t$  до середнього числа відмов системи в цілому за цей же проміжок часу.

Якщо  $t_{cep1} = t_{cep2} = \dots = t_{cepN}$ , тоді максимум інформації буде отриманий у випадку перевірки елемента, для якого  $\beta_i = 0,5$ . Перевірка на першому етапі будь-якого іншого елемента дала б менше інформації.

На другому етапі має бути перевірений елемент, у якого коефіцієнт відмовлення має найбільше значення в порівнянні з іншими, ще неперевіреними елементами, тому що в цьому випадку інформації буде отримано більше, ніж при будь-якому іншому варіанті перевірки.

На третьому етапі перевіряють елемент з найбільшим коефіцієнтом відмовлення серед неперевірених ще елементів та ін.

Таким чином, якщо середній час перевірки будь-якого елемента той самий ( $t_{cepi} = const$ ), тоді відповідно з принципом максимальної швидкості одержання інформації елементи слід перевіряти в послідовності

$$\beta_1 \geq \beta_2 \geq \beta_3 \geq \dots \geq \beta_j \geq \dots \geq \beta_N.$$

Зважаючи на те, що середній час перевірки кожного елемента  $t_{cepi}$  різний, оптимальна послідовність перевірки елементів відповідно з принципом максимальної швидкості одержання інформації визначається рядом

$$\frac{\beta_1}{t_{cep1}} \geq \frac{\beta_2}{t_{cep2}} \geq \dots \geq \frac{\beta_j}{t_{cepj}} \geq \dots \geq \frac{\beta_N}{t_{cepN}}.$$

Якщо коефіцієнти відмовлень елементів рівні між собою ( $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_j = \dots = \beta_N$ ), а середній час  $t_{cepi}$  перевірки елементів різний, тоді для отримання оптимального діагностичного процесу елементи необхідно перевіряти в такій послідовності:

$$t_{cep1} \leq t_{cep2} \leq \dots \leq t_{cepj} \leq \dots \leq t_{cepN}.$$

Якщо  $t_{cep1} = t_{cep2} = \dots = t_{cepj} = \dots = t_{cepN}$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_j = \dots = \beta_N$ , тоді послідовність перевірок не має значення, тобто перевірку можна починати з будь-якого елемента.

**Метод групових перевірок** передбачає одночасну перевірку деякої групи елементів, у якій може знаходитися елемент, що відмовив. Якщо перевірка дає позитивний результат, тобто з'ясовується, що несправний елемент знаходиться в групі, яку перевіряють, тоді цю групу знову розбивають на дві підгрупи і відшукування несправності ведуть серед елементів цих підгруп. При негативному результаті перевірки піддають групу елементів, що залишилася (неперевірена). Такий процес розподілу продовжують до виявлення елемента, що відмовив. Тому часто цей метод називають *методом половинного розподілу* чи *методом середньої точки*. У цьому методі оптимальну програму відшукування елемента, що відмовив, розробляють заздалегідь, тобто ще до настання відмовлення системи. Покладають, що система складається з  $N$  послідовно з'єднаних елементів і в системі можлива наявність тільки одного відмовлення. Крім того, допускають, що на початку відмовлення будь-якого елемента з однаковою ймовірністю може бути причиною відмовлення системи і що середній час перевірки будь-якої групи елементів однаковий. Тоді принцип максимальної швидкості отримання інформації вироджується в принцип максимуму інформації на кожному етапі діагностичного процесу.

Для отримання максимальної кількості інформації на першому етапі діагностичного процесу систему поділяють на дві такі підсистеми, коефіцієнти відмови яких були б однакові. Якщо коефіцієнти відмови всіх елементів рівні між собою  $\left(\beta_i = \frac{1}{N}\right)$ , необхідно розділити систему на рівні підсистеми, коефіцієнт відмовлення кожної з яких дорівнює  $0,5$  (якщо число елементів у системі парне). Для першої підсистеми коефіцієнт відмови  $B_1$  дорівнює

$$B_1 = \sum_{i=1}^{N/2} \beta_i = \frac{1}{N} \frac{N}{2} = 0,5.$$

Отже коефіцієнт відмови другої підсистеми також дорівнює  $0,5$ .

Перевірявши сигнал на виході першої підсистеми, можна встановити, чи містить ця підсистема елемент, який відмовив, чи ні. Якщо елемент, що відмовив, знаходиться у першій підсистемі, тоді друга підсистема справна і коефіцієнти ві-

дмовлення її елементів дорівнюють нулю. Подальшій перевірці мають бути піддані елементи першої підсистеми.

Після першої перевірки коефіцієнти відмовлення першої підсистеми нормують. Величини коефіцієнтів відмови елементів першої підсистеми визначають із співвідношення

$$B_1^l = \sum_{i=1}^{N/2} \beta_{il}^l = 1,0,$$

звідки

$$\beta_{il}^l = \frac{2}{N},$$

де  $\beta_{il}^l$  - коефіцієнт відмови  $i$ -того елемента першої підсистеми після першого досліді.

На другому етапі перевірки системи першу підсистему поділяють на дві рівні підгрупи і виконують перевірку стану кожної з них. Такий розподіл елементів на групи виконують доти, поки не буде встановлено елемент, який відмовив.

Якщо коефіцієнти відмови  $\beta_i$  неоднакові й середній час перевірки стану будь-якої групи елементів різний, тоді вибір оптимального варіанта розбивки системи на підсистеми зводиться до наступного.

Для проведення першого досліді знаходять суму коефіцієнтів відмовлення різних варіантів розбивки елементів системи на групи:

$$B_1 = \beta_1; B_2 = \beta_1 + \beta_2; \dots; B_k = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_k; \dots; B_{N-1} = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_{N-1}.$$

Для кожного варіанта підраховують кількість інформації, що може бути отримана. Так, якщо система розбита на дві групи, що включають такі елементи:

перша група – елемент № 1;

друга група – елементи з другого до  $N$ -го,

тоді кількість інформації, що може бути отримана у першій групі, дорівнює

$$I_1 = -[B_1 \log B_1 + (1 - B_1) \log(1 - B_1)].$$

У другій групі:

$$I_2 = -[B_2 \log B_2 + (1 - B_2) \log(1 - B_2)].$$

Аналогічно визначають кількість інформації, що може бути отримана при всіх інших можливих розбивках елементів.

Для кожного варіанта розбивки на першому етапі визначають швидкість отримання інформації

$$V_1 = \frac{I_1}{t_{cep1}}; V_2 = \frac{I_2}{t_{cep2}}; \dots; V_k = \frac{I_k}{t_{cepk}}; \dots; V_{N-1} = \frac{I_{N-1}}{t_{cepN-1}};$$

де  $t_{cep1}$  - середній час перевірки стану першого елемента;  $t_{cep2}$  - середній час перевірки стану першого і другого елементів та ін.

Усі результати розрахунків зводять у матрицю оцінок (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Матриця оцінок

Сума коефіцієнтів відмовлення у групі	$B_1$	$B_2$	...	$B_k$	...	$B_{N-1}$
Кількість отриманої інформації	$I_1$	$I_2$	...	$I_k$	...	$I_{N-1}$
Швидкість отримання інформації	$V_1$	$V_2$	...	$V_k$	...	$V_{N-1}$

Аналізуючи матрицю оцінок, вибирають для проведення першого досліду (перевірки) такий варіант розбивки системи на групи, що забезпечує найбільшу швидкість отримання інформації.

При переході до другого етапу пошуку, групи елементів, що утворилися, розглядають як самостійні. Коефіцієнти відмови в кожній групі нормують. Так, якщо на першому етапі розбивку проводили за  $k$ -тим елементом (елемент із номером  $k$  був віднесений до першої групи), тоді при переході до другого етапу, нормувальні коефіцієнти відмови визначають за формулами

$$\beta_{i1}^1 = \frac{\beta_i}{\sum_{i=1}^k \beta_i} \quad (\text{група 1});$$

$$\beta_{i2}^1 = \frac{\beta_i}{\sum_{i=k+1}^N \beta_i} \quad (\text{група 2}).$$

Потім для кожної з груп складають можливі варіанти розбивки елементів на підгрупи й обчислюють  $B_i^1$ ,  $I_i^1$  і  $V_i^1$ , де  $i$  - номер розбивки ( $1 \leq i \leq k$  для групи 1 і  $(k+1) \leq i \leq N$  - для групи 2), для того, щоб знайти максимум  $V_i^1$  і номери елементів розбивки кожної з груп на другому етапі пошуку.

Який із двох варіантів дослідів доведеться проводити на другому етапі пошуку, залежить від того, в якій із груп виявиться несправний елемент. Це з'ясуєть-



ся тільки після проведення досліду на першому етапі. Можливих перевірок третього етапу буде чотири, четвертого – вісім, п'ятого – шістнадцять та ін.

Обов'язковою умовою застосування методу групових перевірок є наявність функціональних зв'язків між елементами. Тому при слабких функціональних зв'язках чи їхній відсутності перевагу слід віддавати методу поелементних перевірок.

### **6.3. Оптимальне управління експлуатаційними процесами**

Збільшення показників надійності й готовності систем здійснюється за рахунок своєчасного проведення регулювальних робіт, заміни елементів і перевірок працездатності системи.

Для планування і управління експлуатаційними процесами застосовують методи динамічного і лінійного програмування, статистичних дослідів (метод Монте-Карло), сіткового планування та ін. Для формального описування моделей експлуатації використовують математичний апарат теорії керованих випадкових процесів, теорії відновлення, мінімаксні методи, правила припинення спостережень та ін.

У рамках теорії випадкових процесів для описування моделей профілактики широко використовують марківські й напівмарківські процеси.

Випадковий процес є марківським, якщо в ймовірнісні характеристики його в майбутньому залежать тільки від того, в якому стані цей процес знаходиться в даний момент часу, і не залежать від того, яким чином цей процес протікав у минулому. Такий процес називають випадковим без післядії.

Якщо випадковий марківський процес має не безперервний, а дискретний характер переходів з одного стану в інший, тоді він називається *марківським ланцюгом*, чи процесом з дискретним часом.

При описуванні марківських ланцюгів основними є поняття *стану і переходу від одного стану в інший*. Система знаходиться в деякому стані, якщо вона цілком описується значеннями змінних, які задають цей стан. Система переходить з одного стану в інший, якщо перемінні, які її описують, змінюються від значень, що задають один стан, до значень, що визначають інший.

Можливі стани системи можуть бути зображені за допомогою графів станів. Імовірності переходу системи з одного стану в інший представляють звичайно у вигляді матриць перехідних імовірностей.

У загальному вигляді для марківського ланцюга зі станами  $a_1$ ,  $a_2$  і  $a_3$  перехідні ймовірності  $P_i$  можуть бути записані в матричній формі:

$$P = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{vmatrix},$$

чи в загальному вигляді:  $P = |P|$ .

Нехай задані деякі числові значення ймовірностей, зазначені в нижченаведеній матриці, що має вигляд

$$P = \begin{matrix} & a_1 & a_2 & a_3 \\ a_1 & \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1/2 \\ 1/3 & 0 & 2/3 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

Суми ймовірностей у кожному рядку матриці обов'язково дорівнюють одиниці, тому що елементи кожного  $i$ -того рядка представляють ймовірності всіх можливостей даного процесу, що знаходиться у стані  $a_i$ . Нулі у відповідних рядках чи стовпцях матриці вказують на можливість відповідних переходів. Якщо нулі стоять на головній діагоналі матриці, це означає неможливість переходів зі стану  $a_1$  в  $a_1$ , чи з  $a_3$  в  $a_3$ , чи в загальному випадку з  $a_i$  в  $a_i$ .

Інтервал часу між сусідніми переходами називають кроком.

Крім матриць ймовірностей переходів  $P$ , марківський ланцюг має бути визначений ще і матрицею розподілу часу переходів  $\tau(i, j)$  з одного стану в інший, тобто деякою матрицею

$$F = \|P\{\tau(i, j)\}\|,$$

в якій кожному ненульовому елементу матриці  $P$  відповідає свій розподіл.

Що стосується напівмарківських процесів, то, зберігаючи основну марківську властивість – не мати наслідку, вони мають більш загальний характер, ніж звичайні марківські процеси. Зокрема, розподіл часу  $\tau(i, j)$  переходів з одного стану в інший може бути довільним.

Крім того, допускають випадки, коли  $P_{ij} = 0$ , тобто система чи її елемент може повертатись у той же стан, причому такий перехід триває протягом часу  $\tau(i, j)$  з функцією розподілу часу  $F_{ij}(t)$ .

Напівмарківський процес може бути представлений і однією матрицею  $Q$  замість двох  $P$  і  $F$ :

$$Q = \|Q_{ij}(t)\|,$$

де  $Q_{ij}(t)$  - імовірність події, що при вихідному стані  $E_i$  процес  $\xi_t$  перейде за один крок у стан  $E_j$ , причому час перебування  $\xi_t$  у стані  $E_i$  не перевищить величини  $t$ . Імовірність події

$$Q_{ij}(t) = P_{ij} F_{ij}(t).$$

Іноді може мати місце і вироджений розподіл  $\tau(i, j)$ , при якому випадкова величина  $\tau(i, j)$  з імовірністю одиниці дорівнює деякій константі  $T$ .

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Системологія на транспорті. Підручник у 5 кн. / За ред. Дмитриченка М.Ф.– Кн. I: Основи теорії систем і управління / Е.В. Гаврилов, М.Ф. Дмитриченко, В.К. Доля, О.Т. Лановий, І.Е. Линник, В.П. Поліщук.- К.: Знання України, 2005 - 344 с.
2. Беллман Р., Задэ Л. Принятие решений в расплывчатых условиях.- /В кн.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений.- М.: Мир, 1976.
3. Березовский Б.А., Барышников Ю.М., Борзенко В.И., Кемпнер Л.М. Многокритериальная оптимизация: Математические аспекты.- М.: Наука, 1989.- 128 с.
4. Берталанфи Л. Общая теория систем: критический обзор.- /В кн.: Исследования по общей теории систем.- М.: Прогресс, 1969.- С. 23 – 82.
5. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986.- 432 с.

## НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Конспект лекцій з дисципліни «Основи теорії систем і управління» (для студентів 3 курсу всіх форм навчання напряму підготовки 6.070101 "Транспортні технології").

Автори: Віктор Костянтинович Доля,  
Олексій Володимирович Прасоленко

Редактор: М.З. Аляб'єв

Верстка: І.В. Волосожарова

План 2009, поз.197Л

---

Підп. до друку 8.04.2009 р.	Формат 60x84/16	Папір офісний.
Друк на ризографі	Умовн.– друк. арк. 3,7	Обл.- вид. арк. 4,2
Замовл. №	Тираж 100 прим.	

---

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12

---

Сектор оперативної поліграфії ЦНІТ ХНАМГ

---

61002, Харків, вул. Революції, 12