


СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ:  
КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Запоріжжя 2025



УДК 003.2 (072)  
С34

Рекомендовано Науково-методичною  
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ  
ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 2 від 21.11.2025 р.)

**Укладачі:**

*Гетьман І.А., канд. техн. наук*

*Міхєєнко Д.Ю., канд. техн. наук*

*Держевецька М.А., канд. екон. наук*

С34 Системний аналіз : конспект лекцій / уклад. І. А. Гетьман, Д. Ю. Міхєєнко,  
М. А. Держевецька. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025. 140 с.

Конспект лекцій з дисципліни «Системний аналіз» призначений для студентів спеціальності «Комп'ютерні науки». У конспекті подано основні поняття, принципи та методи системного аналізу, що застосовуються для дослідження, проектування й оптимізації складних технічних, інформаційних та соціально-економічних систем. Матеріал охоплює питання системного підходу, моделювання, декомпозиції, оцінювання, порівняння систем і методів вирішення задач системного аналізу. Конспект сприяє формуванню у студентів системного мислення, розвитку аналітичних навичок і здатності приймати обґрунтовані рішення у сфері комп'ютерних наук. Робота може бути використана як навчально-методичний посібник під час лекцій, практичних занять і самостійного опрацювання дисципліни.

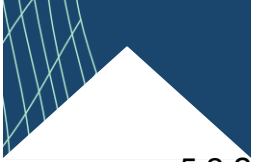
УДК 003.2 (072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ТЕМА 1. ВСТУП ДО ПРОБЛЕМАТИКИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ.....	7
1.1 Сучасні уявлення про склад загальної теорії систем.....	7
1.2 Історія розвитку системних уявлень.....	8
1.3 Основні напрямки системних досліджень.....	10
1.4 Передумови та необхідність виникнення системного підходу.....	12
1.5 Предмет системного аналізу.....	13
1.6 Принципи системного підходу.....	16
1.7 Види та методи системного аналізу.....	19
1.8 Висновки до теми.....	23
ТЕМА 2. ПОНЯТТЯ СИСТЕМИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ.....	24
2.1 Основні положення теорії систем.....	24
2.2 Поняття системи. Властивості систем.....	25
2.3 Класифікація систем.....	27
2.4 Задачі вивчення систем.....	29
2.5 Висновки до теми.....	31
ТЕМА 3. ПОНЯТТЯ МОДЕЛЮВАННЯ. МОДЕЛІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ.....	32
3.1 Моделювання як спосіб наукового пізнання та його призначення в системному аналізі. Поняття адекватності моделі.....	32
3.2 Класифікація моделей.....	38
3.3 Модель «Чорний ящик».....	42
3.4 Перехід до моделі «Білий ящик».....	45
3.5 Модель «Структури системи».....	45
3.6 Системна модель з різними рівнями абстракції.....	46
3.7 Модель «Склад системи».....	47
3.8 Модель «Структура системи».....	49
3.9 Модель «Структурна схема».....	51
3.10 Математичні аспекти побудови моделей складних систем.....	52
3.11 Висновок до теми.....	56
ТЕМА 4. ДЕКОМПОЗИЦІЯ СИСТЕМ ТА МЕТОДИ ЇХ ОЦІНЮВАННЯ.....	57
4.1 Декомпозиція систем. Поняття проектування.....	57
4.2 Блочно-ієрархічний підхід до аналізу та опису систем.....	60
4.3 Системний аналіз об'єктів на початкових етапах життєвого циклу.....	63
4.4 Синтез проектних рішень. Представлення інформації про об'єкт з використанням І-дерев.....	66
4.5 Синтез технічних рішень на основі використання І-АБО-дерев.....	67
4.6 Застосування комп'ютерних систем у процесі декомпозиції.....	70
4.7 Інтерактивний підхід до декомпозиції.....	72
4.8 Висновки до теми.....	73
ТЕМА 5 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ.....	75
5.1 Розвиток систем. Показники розвитку систем. Життя технічних систем.....	76



5.2 Закони розвитку технічних систем.....	82
5.3 Критерії розвитку технічних систем.....	84
5.4 Функціональні критерії розвитку технічних систем.....	87
5.5 Технологічні критерії розвитку технічних систем.....	88
5.6 Економічні критерії розвитку технічних систем.....	90
5.7 Антропологічні критерії розвитку технічних систем.....	92
5.8 Якість функціонування систем. Показники якості та ефективності.....	93
5.9 Показники та критерії ефективності функціонування систем.....	96
5.10 Висновки до теми.....	99
<b>ТЕМА 6. МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ СИСТЕМ.....</b>	<b>100</b>
6.1 Методи якісного оцінювання систем.....	100
6.2 Методи експертних оцінок.....	101
6.3 Метод сканування.....	109
6.4 Методи «мозкової атаки».....	110
6.5 Методи сценаріїв.....	111
6.6 Метод Дельфі.....	112
6.7 Морфологічні методи.....	113
6.8 Методи організації пошуку нових рішень.....	114
6.9 Методи кількісного оцінювання систем.....	114
6.10 Висновки до теми.....	120
<b>ТЕМА 7. МЕТОДИ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ.....</b>	<b>121</b>
7.1 Мережі Петрі.....	122
7.2 Таблиці рішень.....	124
7.3 Дерева рішень.....	129
7.4 Висновки до теми.....	138
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>139</b>



## ВСТУП

Розвиток комп'ютерних технологій, інформаційних систем та засобів обробки даних супроводжується зростанням складності об'єктів, процесів і завдань, які потребують науково обґрунтованого підходу до їх аналізу та управління. Багато технічних, економічних, соціальних та інформаційних систем характеризуються великою кількістю взаємозалежних елементів, що утворюють складні структури. Для ефективного дослідження таких систем необхідні методи, які дозволяють розглядати їх як єдине ціле, враховуючи взаємозв'язки між компонентами та вплив зовнішнього середовища.


Одним із найважливіших напрямів, що забезпечує цілісне вивчення складних об'єктів і процесів, є системний аналіз. Ця наукова дисципліна формує підхід, за якого будь-який об'єкт досліджується як система - сукупність елементів, об'єднаних спільною метою, структурою та функціональними зв'язками. Системний аналіз поєднує методи математики, інформатики, кібернетики, моделювання, управління та економіки, що дозволяє комплексно підходити до розв'язання складних задач різної природи.

Метою дисципліни «Системний аналіз» є формування у студентів спеціальності «Комп'ютерні науки» системного мислення, вміння бачити проблему в її повноті, визначати структуру системи, аналізувати взаємодію елементів, виявляти закономірності її функціонування та розробляти ефективні шляхи удосконалення.

У процесі вивчення курсу розглядаються основні поняття та принципи системного підходу, класифікація систем, методи моделювання, декомпозиції, оцінювання, порівняння, оптимізації та прийняття рішень. Особлива увага приділяється використанню інформаційних технологій і програмних засобів у системному аналізі, що дозволяє застосовувати теоретичні знання на практиці.

Актуальність вивчення системного аналізу для майбутніх фахівців ІТ-галузі зумовлена потребою в ефективному управлінні складними інформаційними процесами, аналізі великих масивів даних, оптимізації архітектури програмних систем і побудові інтелектуальних моделей підтримки прийняття рішень.

Розробка програмного забезпечення, проектування баз даних, створення кіберфізичних систем, штучного інтелекту та хмарних технологій неможливі без застосування системного підходу. Саме системний аналіз надає аналітичний інструментарій, що дозволяє ефективно поєднувати апаратно-програмні, інформаційні та організаційні складові в єдине цілісне середовище.



Основними завданнями дисципліни є: формування розуміння сутності та значення системного підходу; засвоєння методів побудови та дослідження моделей складних систем; розвиток навичок кількісного та якісного оцінювання параметрів систем; навчання прийняттю раціональних рішень в умовах багатокритеріальності й невизначеності; підготовка до практичного застосування системного аналізу в професійній діяльності.

Вивчення курсу «Системний аналіз» має важливе значення для майбутніх фахівців з комп'ютерних наук, адже забезпечує розуміння принципів побудови й функціонування складних інформаційних систем, сприяє розвитку аналітичного мислення та здатності до узагальнення, прогнозування й оптимізації процесів.

Опанування методів системного аналізу дає змогу студентам ефективно вирішувати завдання, пов'язані з розробкою, впровадженням і вдосконаленням програмних та апаратних засобів, створювати надійні, адаптивні й ефективні системи різного призначення.

Конспект лекцій узагальнює теоретичний матеріал дисципліни, систематизує основні поняття й підходи системного аналізу та може бути використаний під час лекційних і практичних занять, а також для самостійного опрацювання студентами. Він слугує базою для подальшого вивчення спеціалізованих дисциплін, пов'язаних із проєктуванням, моделюванням і керуванням складними системами у сфері комп'ютерних наук.



## ТЕМА 1. ВСТУП ДО ПРОБЛЕМАТИКИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

Із розвитком науки, техніки та інформаційних технологій об'єкти, процеси й системи, що оточують людину, стають дедалі складнішими. Для прийняття ефективних управлінських і технічних рішень необхідно володіти інструментами, що дозволяють аналізувати складні ситуації, враховувати множину взаємопов'язаних факторів та прогнозувати наслідки прийнятих дій.

Системний аналіз є універсальним науковим підходом, який забезпечує обґрунтування рішень у складних умовах, сприяє розумінню структури, функцій і взаємозв'язків елементів системи. Він поєднує методи логічного, математичного, евристичного та комп'ютерного моделювання, створюючи основу для формування системного мислення у фахівців.

Знання основ системного аналізу є необхідним для вирішення задач управління, проектування, прогнозування та оптимізації у різних сферах діяльності - від технічних і економічних до соціальних та екологічних.

### 1.1 Сучасні уявлення про склад загальної теорії систем

Загальна теорія систем вивчає можливі аспекти дослідження систем, в тому числі і прийняття рішень в них. Системний аналіз є складовою частиною теорії систем разом із такими дисциплінами, як: кібернетика, інформатика, дослідження операцій та системотехніка (рис. 1.1).

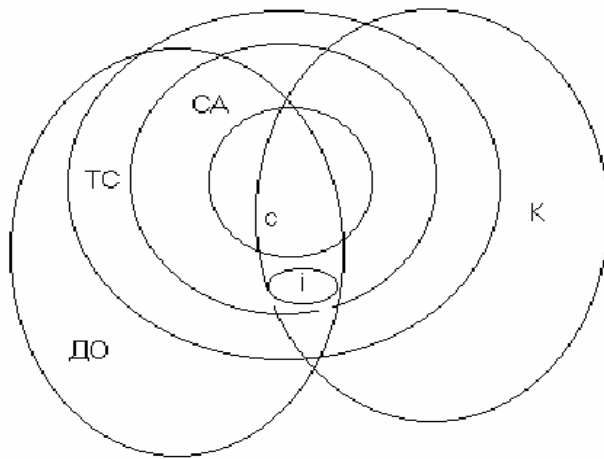
Розвиток методів системного аналізу в основному пов'язаний із розвитком складових частин загальної теорії систем.

Кібернетика - вивчає системи зі зворотнім зв'язком і аспект керування інформацією в цих системах, розглядаючи при цьому строго формалізовані задачі.

Інформатика - займається дослідженням процесів збереження, накопичення, перетворення, передачі даних та інформації із застосуванням комп'ютерної техніки.

Дослідження операцій - вивчає методи прийняття рішень при цьому переважно розглядаються формалізовані задачі.

Системотехніка - наука, яка вивчає застосування методів системного аналізу для дослідження технічних схем.



ТС – теорія систем  
 К – кібернетика  
 ДО – дослідження  
 операцій  
 СА – системний аналіз  
 С – системотехніка  
 І – інформатика

Рисунок 1.1 – Складові системного аналізу

Системний аналіз - це сукупність методологічних засобів, які використовуються для підвищення ступеня обґрунтованості рішень у складних (слабко-структурованих) проблемах політичного, військового, наукового, соціального і економічного характеру. Системний аналіз передбачає розгляд об'єктів як систем, переважно цілеспрямованих. Основні методологічні засади системного аналізу базуються на принципах системного підходу.

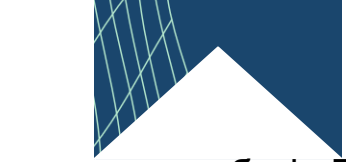
Необхідність вивчення методологій та методів системного аналізу обумовлена потребами його застосування при створенні та розвитку комп'ютеризованих інформаційних систем. У яких існують складні часто слабко структуровані зв'язки між елементами. Не систематизоване внесення змін в елементи та зв'язки цих систем часто призводить до зниження ефективності їх функціонування.

## 1.2 Історія розвитку системних уявлень

Історія розвитку методів системного аналізу стосується розвитку складових загальної теорії систем і пов'язана із розвитком двох понять: системності та керування, яке включає етапи прийняття рішень. Обидва поняття усвідомлено чи неусвідомлено застосовували ще з давніх-давен.

Розглянемо основні історичні віхи, які супроводжували наукове становлення цих понять.

1. Питання про науковий підхід до керування складними системами вперше в конкретному вигляді було поставлене *М.А. Ампером* в його




роботі «Дослідження філософії наук, або аналітичний виклад класифікації всіх людських знань» (част. I - 1834 р., II - 1843 р.), в якій була виділена наука про керування державою, названа кібернетикою.

II. Польський вчений *Броніслав Трентовський*, професор Фрайбургського університету, видав в 1843 р. в Познані польською мовою книгу «Ставлення філософії до кібернетики як до мистецтва керування народом». Особливістю праці Броніслава Трентовського було відображення наукових основ практичної діяльності керівника – «гібернаета». Сенсгрецького слова *χοῦερνω* (гіберно) був добре зрозумілий ще в XIX-му сторіччі - адміністративна одиниця, населена людьми. В ширшому сенсі - об'єкт керування, до складу якого входять люди, а *χοῦερνετ* (гібернет) - особа, що керує ресурсами та людьми, які населяють територію, який повинен вміти, виходячи з загального блага, примиряти деякі суперечності, інші - загострювати, скеровуючи розвиток до потрібної мети. За Трентовським дійсно ефективно керування повинно враховувати всі внутрішні та зовнішні фактори, що впливають на об'єкт керування, а головна складність його реалізації пов'язана зі складністю поведінки людей. Броніслав Трентовський далеко просунувся в розумінні та усвідомленні системності людських колективів, груп, розумінні складності керування людьми.

III. Наступний етап у вивченні системності як самодостатнього предмета пов'язаний з прізвищем *О.О. Богданова* (справжнє прізвище – Малиновський), який протягом 1911-1925 рр. видав 3 томи книги про тектологію.

За Богдановим в суспільстві (і в біологічних системах) існує функціональна сторона, його прагнення швидко адаптуватися, і консервативна – це архітектурна схема організації. Лише активне використання зовнішнього середовища забезпечує збереженість системи. Здійснюючи позитивну селекцію, система за рахунок зовнішнього середовища збільшує кількість внутрішніх зв'язків, підвищує свою складність, підвищуючи разом з цим ефективність свого функціонування.

IV. Відчутний вплив на усвідомлення деяких аспектів поняття системності та особливо керування мають роботи *Н. Вінера*. Його праця «Кібернетика», що вийшла з друку в 1948 р. визначає кібернетику як «науку про управління та зв'язок в тваринах та машинах». Пізніше Вінер почав аналізувати процеси в людському суспільстві з точки зору кібернетики. З кібернетикою пов'язаний розвиток таких системних уявлень, як типізація моделей систем, виявлення особливого значення зворотних зв'язків у системі, підкреслення принципу оптимальності в управлінні та синтезі систем, усвідомлення значення інформації та можливостей її кількісного описання, розвиток методології моделювання,



особливо проведення обчислювальних експериментів із застосуванням комп'ютера (що привело до розвитку важливого напрямку моделювання - імітаційного). Однак кібернетика найбільш сильно проявила свої можливості при дослідженні технічних систем.

V. Виникнення загальної теорії систем (ЗТС) пов'язують з іменем австрійського фізіолога *Людвіга фон Берталанфі*, який в 20—30-і роки займався питаннями системного підходу при вивченні живих організмів, розвиваючи загальну точку зору на необхідність цілісного підходу в біології та фізіології. У 1956 р. він організував наукове товариство з досліджень у області ЗТС, що видавало щорічні збірники наукових праць, в яких системний підхід розглядався як універсальна концепція, що об'єднує інтереси різноманітних наук. У 1962-1968 рр. Л. фон Берталанфі включав в ЗТС багато наук: кібернетику, теорію інформації, теорію рішень, топологію, факторний аналіз, теорію множин, теорію мереж, теорію автоматів, теорію масового обслуговування, теорію графів.

### **1.3 Основні напрямки системних досліджень**

Людвіг фон Берталанфі виділяє наступні три основні тенденції в загальної теорії систем (ЗТС): наука про системи; системна технологія; системна філософія (рис. 1.2).

Наука про системи досліджує застосування системних концепцій у фізичних, суспільних науках та науках про поведінку емпіричним чином. Увага зосереджується на науковому вивченні цілого та цілісності на противагу до поелементного, редуцціоністського підходу. Реалізуються спроби оцінки рівнів складності та способів взаємодії і взаємних стосунків між компонентами системи, що аналізується. Широко використовуються математичні моделі для визначення подібності та ізоморфізмів в різних видах систем.

Системна технологія розглядає проблеми, що виникають у промисловості та суспільстві, які можна досліджувати шляхом застосування теорії систем. У системному аналізі, науці про управління, дослідженні операцій, інформатиці та промисловій інженерії концепції загальної теорії систем трансформуються при пошуку практичних розв'язань конкретних проблем.



Рисунок 1.2 - Основні тенденції в загальній теорії систем

Системна філософія намагається концептуалізувати взаємні зв'язки та взаємні залежності між теоріями, що сформульовані в різних сферах наукових досліджень, є спробою об'єднати розділи традиційної науки в межах філософських концепцій загальних систем.

Особливо слід відзначити розвиток системної технології стосовно технічних систем, що дозволило започаткувати новий науковий напрямок – системотехніку. *Системотехніка* виникла у США на початку 50-х років і описує своєрідні «правила поведінки» інженера, що конструює складні системи. Основними завданнями системотехніки є:

- виявлення та описання найзагальніших системних характеристик та закономірностей, що не залежать від конкретного типу технічних комплексів;
- розроблення експериментальних методів, що дозволяють з достатнім рівнем достовірності та за умови прийнятної об'єму ресурсів оцінити теоретичні концепції;
- розроблення методів реалізації принципів системотехніки при створенні та використанні конкретних систем.

Розвиток основних тенденцій в загальній теорії систем спричинив виникнення системології. Вона розглядається як «комплекс понять і концепцій, що стосуються і системного підходу, і системного аналізу, і загальної теорії систем, і системотехніки, і теорії ієрархічних систем», тобто є поєднанням «науки про системи» та окремих аспектів «системної філософії».

## 1.4 Передумови та необхідність виникнення системного підходу

Зародження системного аналізу пов'язують з 2-ю світовою війною та діяльністю «Ренд Корпорейшн» в області планування розвитку озброєнь.

Початкове в системному аналізі (СА) найповніше використовувались методи та математичні засоби теорії дослідження операцій, але в подальшому почали широко застосовуватися евристичні методи (Дельфі, ПАТТЕРН та інші).

*Суттєвим в системному аналізі є наступне:* аналіз систем є способом розгляду проблеми; математичний апарат та комп'ютери можуть бути тут необхідними, але інколи достатніми можуть бути серйозні роздуми над проблемою; в будь-якому аналізі, що пов'язаний з прийняттям рішення в умовах невизначеностей, метою якого є вплив на вибір способу дії, незалежно від його складності, наявні такі елементи, як ціль (цілі), альтернативи (засоби досягнення цілей), витрати чи ресурси (те, що необхідно витратити для реалізації кожної з альтернатив), модель, критерії, згідно з якими обирається альтернатива.


Система є тим ізоморфним принципом, який проникає через усі кордони, що склалися між окремими науками історично, незалежно від того, що ці науки вивчають якісно зовсім різні класи явищ: машини, організми, суспільство.

Системний підхід виник як реакція на бурхливий розвиток аналітичних підходів в науці, які все більш віддаляли творчу думку від проблеми «цілісного організму».

Серед підходів, які суттєво вплинули на формування принципів системного підходу слід виділити: логічний позитивізм, аналітична дедукція, редуccionізм, казуальна (причинна) логіка, індуктивний підхід.

*Логічний позитивізм* стверджує, що існує «об'єктивна» реальність, яка є незалежною та неспотвореною нашими особистими перспективами чи суб'єктивними інтерпретаціями світу. Однак факти є багатовимірними і можуть інтерпретуватися по-різному. Крім того, кожна група вчених надаватиме особливе значення такому підходу до розв'язання складних проблем, який є найсуміснішим з її філософією та методологією.

*Аналітична дедукція* та редуccionістська логіка стверджують, що найкраще можна пояснити ціле шляхом пояснення його частин, тобто редуccionіст розв'язує складну проблему шляхом розбиття її на складові та окремого дослідження кожної з них, що приводить до розвитку спеціалізованих дисциплін з певними сферами дослідження та впливу. Отже, виникає множинність в підходах, вчені спілкуються в межах своїх дисциплін, не розуміють наукову мову (тезаурус предметної області) один одного і не є в стані оперувати з системними проблемами.



В більшості випадків наше мислення ґрунтується на *концепції причинності*, монолітної *казуальної (причинної) логіки*. Згідно детерміністської концепції, спостереження (колишні стани системи) разом із законами природи визначають її майбутній стан

Редукціонізм є позитивним явищем у тому сенсі, що він забезпечує концептуальну основу, засоби і процедури для ідентифікації та вивчення важливих факторів, що входять у визначення проблеми. Однак дедуктивні методи не працюють або працюють погано, якщо наявно багато пов'язаних між собою факторів або вони неусвідомлені як фактори.

*Індуктивний* погляд ґрунтується на узагальненні окремих спостережень, тобто різні наукові дисципліни - це необхідні, але недостатні підґрунтя, використовуючи які ми формуємо теорії про досвід та знання.

*Системний підхід синтезує індуктивний та дедуктивний спосіб мислення з залученням інтуїтивних підходів* (натхнення, образні типи мислення та ін.).

Одним з призначень системного аналізу (СА) є правильний відбір системного інструментарію для розв'язання поставленої проблеми.

Декомпозиція мети - теж одне з призначень СА.

Ще одне призначення СА - це формування критеріїв відбору засобів для досягнення цілей.

Обґрунтування вибору рішення - це теж одне з призначень СА.

*Призначення системи*, створеної людьми, спочатку визначається тими, хто її проектував, а пізніше користувачі пристосовують систему відповідно до своїх цілей.


Система може мати різні призначення в залежності від точки зору спостерігача.

Отже, поява та розвиток методів СА викликані новими рисами в тих проблемах, які людина повинна розв'язувати в сучасних умовах, а саме:

- зрослий масштаб проблем, які підлягають вирішенню;
- зростання взаємного впливу проблем одна на іншу;
- великий ризик неефективних витрат та втрат - а це приводить до вимоги старанно обґрунтовувати рішення;
- необхідність правильної постановки цілей, формування програми їх досягнення.

## **1.5 Предмет системного аналізу**

*Системний аналіз спрямований на розв'язання складних проблем.* Проблема виникає тоді, коли є розходження між бажаним та дійсним,



тобто це абстрактна категорія, що відображає розуміння людьми мотивів своєї діяльності. Проблеми породжуються та розв'язуються людьми, а тому поняття «проблема» має людські риси сприйняття, що породжує наступні труднощі:

- неясність розуміння проблеми;
- складнощі постановки проблем на віддалену перспективу;
- складність класифікації проблем і, як наслідок, вибір неадекватних засобів їх розв'язання;
- спотворена оцінка проблем (близькі, але дрібні проблеми затуляють великі, але віддалені);
- неправильна оцінка значимості проблем внаслідок вузькопрофесійної точки зору;
- змішування цілей, які необхідно досягнути, з засобами їх досягнення.

*Метою застосування системного аналізу до конкретної проблеми є підвищення ступеня обґрунтованості рішення, що приймається.* Для системного аналізу важливими є наступні методологічні принципи: органічна єдність суб'єктивного та об'єктивного; структурність системи, що визначає цілісність та стійкість характеристик системи; динамізм систем; міждисциплінарний характер системних досліджень; органічна єдність формального та неформального при проведенні СА.


На відміну від доволі широкої системної методології *системний аналіз обмежують дві наступні особливості:*

- системні аналітики вивчають лише штучно створені системи, в яких людині належить надзвичайно важлива, а в багатьох випадках і вирішальна роль;
- головна задача СА - прийняття рішень і управління.

*Системний аналіз* - це методологія дослідження таких властивостей та відношень в об'єктах, які важко спостерігаються та важко розуміються, за допомогою представлення цих об'єктів у вигляді цілеспрямованих систем та вивчення властивостей цих систем та взаємних відношень як відношень між цілями та засобами їх реалізації.

*Системний аналіз відрізняється від інших методів дослідження тим, що:*

- враховує принципову складність об'єкта, що досліджується; бере до уваги розгалужені та стійкі взаємні зв'язки його з оточенням; враховує неможливість спостереження ряду властивостей об'єкта та оточуючого середовища;
- реальні явища, їх властивості та зв'язки з оточенням переводяться далі в абстрактні категорії теорії систем;
- ґрунтуючись на відомих властивостях складних систем дозволяє виявити нові конкретні властивості та взаємні зв'язки конкретного об'єкта



дослідження;

- на відміну від інших методів, в яких точно визначені об'єкти, включає як один з важливих етапів визначення об'єкта, його знаходження чи конструювання;

- орієнтується не на розв'язання «правильно сформульованих» задач, а на створення правильної постановки задачі, вибір відповідних методів для її розв'язання;

- основне в СА - знайти шлях, яким можна перетворити складну проблему в простішу, яким чином не лише складну до розв'язання, але й для розуміння, проблему перетворити в послідовність задач, для яких існують методи їх розв'язання;

- СА завжди конкретний - завжди має справу з конкретною проблемою, конкретним об'єктом дослідження, є продуктивним тоді, коли застосовується до розв'язання завдань певного типу.

*Системний аналіз застосовується для розв'язання складних проблем, що пов'язані з діяльністю людей.*

Людську діяльність умовно можна поділити на дві області: рутинна діяльність, розв'язання регулярних, щоденних завдань; розв'язання нових задач, які виникають вперше.

*Окрім того, проблеми розрізняються за ступенем їх структурованості:*

- добре структуровані та сформульовані кількісно;

- слабо структуровані, в яких зустрічаються як кількісні, такі якісні оцінки;

- неструктуровані, якісні проблеми.

Перший тип проблем не потребує СА, оскільки існує потужний апарат математичного моделювання та строгі кількісні методи розв'язання. Основною областю застосування методів СА є *слабо структуровані проблеми*, а для розв'язання неструктурованих проблем в більшості застосовуються евристичні методи.


*Потреба в СА виникає в тому випадку, коли виникають наступні ситуації:*

- розв'язується нова проблема, і за допомогою СА вона формулюється, визначається, що і про що потрібно дізнатися, і хто повинен знати;

- розв'язання проблеми передбачає координацію цілей з множиною засобів їх досягнення;

- проблема має розгалужені зв'язки, що викликають віддалені наслідки в різних галузях, і прийняття рішення в таких випадках потребує врахування сукупної ефективності та повних затрат;

- існують варіанти розв'язання проблеми або досягнення взаємно пов'язаного комплексу цілей, які важко порівняти;

- 
- створюються нові складні системи;
  - здійснюється вдосконалення, реконструювання виробництва, необхідна реінженерія бізнес-процесів;
  - при створенні інформаційних систем та комп'ютеризованих систем керування;
  - коли важливі рішення повинні прийматися за наявності невизначеності та ризику та (або) на достатньо віддалену перспективу.

*Для забезпечення успіху СА потрібно:*

- застосовувати його у тих випадках, для яких він призначений;
- наявність потреби, зрозумілої мети та (або) призначення;
- відповідальне ставлення як аналітиків, так і організації-замовника;
- наявність накопиченої інформації, досвіду, ідей та уявлень про предмет дослідження;
- відображення в результатах СА реального стану справ та реальних шляхів розв'язання проблем, а не «обґрунтування» суб'єктивних рішень;
- наявність ресурсів – кваліфікованих експертів, обладнання, грошових засобів;
- аналіз можливого впливу сторонніх побічних факторів (прогноз наукових відкриттів, винаходів, політичної ситуації).

## **1.6 Принципи системного підходу**

Формулювання вимог до системи та до методології розв'язування проблем досягається шляхом визначення основних положень, або принципів системного підходу, які є досить загальними твердженнями, що узагальнюють досвід роботи людини зі складними системами. Такими принципами є наступні:


*Принцип остаточної (глобальної) мети:* глобальна мета системи має абсолютний пріоритет;

*Принцип єдності:* сумісний розгляд системи і як цілого, і як сукупності компонентів (елементів, підсистем, системотворчих відношень);

*Принцип зв'язності:* довільна компонента системи розглядається сумісно з її зв'язками з оточенням;

*Принцип модульності:* в багатьох випадках в системі доцільно реалізувати декомпозицію на складові (модулі) різного ступеня загальності та розглядати її як сукупність модулів та зв'язків між ними;

*Принцип ієрархії:* в більшості випадків в системі доцільно реалізувати ієрархічну побудову та (або) впорядкування (можливий



напівпорядок) її складових за важливістю;

*Принцип функціональності:* структура системи та її функції повинні розглядатися сумісно з пріоритетом функції над структурою;

*Принцип розвитку:* необхідно враховувати змінність системи, її здатність до розвитку, розширення, заміни складових, накопичення інформації;

*Принцип децентралізації:* в управлінні системою співвідношення між централізацією та децентралізацією визначається призначенням та метою системи;

*Принцип невизначеності:* невизначеності та випадковості повинні братися до уваги при визначенні стратегії та тактики розвитку системи.

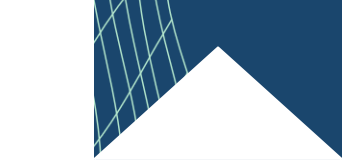
Принцип остаточної (єдиної, генеральної, глобальної) мети означає, що всистемі все повинно бути спрямоване на досягнення призначення, підпорядковане глобальній меті. Будь-які зміни, удосконалення та управління повинні оцінюватися виходячи з того, чи сприяють вони досягненню остаточної мети. В дещо модифікованому вигляді принцип остаточної мети застосовується до систем, що не є цілеспрямованими - для таких систем поняття остаточної мети замінюється поняттям основної функції, основної властивості системи. Принципи єдності, зв'язності та модульності доволі тісно пов'язані між собою, але якщо принцип єдності відображає «погляд ззовні» на систему, то принцип зв'язності орієнтує на «погляд зсередини» системи. На різних етапах дослідження системи ці погляди можуть знаходитися у різному співвідношенні.

Принцип модульності вказує на можливість розгляду замість частини системи сукупності входів та виходів цієї частини, тобто дозволяє абстрагуватися від зайвої деталізації за умови збереження можливості адекватного описання системи.

Принцип ієрархії акцентує увагу на корисності відшукання або створення в системі ієрархічного характеру зв'язків між її елементами, цілями, модулями. Ієрархічні системи, зазвичай, створюються та досліджуються «згори», починаючи з аналізу модулів вищих рівнів ієрархії. У випадку відсутності ієрархії дослідник повинен вирішити, в якому порядку він буде розглядати складові системи та напрямок конкретизації своїх уявлень.

Принцип функціональності стверджує, що довільна структура тісно пов'язана з функціями системи та її складових, і створювати (досліджувати) структуру необхідно після зрозуміння функцій системи. З практичної точки зору це означає, що у випадку надання системі нових функцій доцільно переглядати її структуру, а не прагнути «втиснути» нову функцію в стару структуру.

Принцип розвитку повинен закладатися при побудові штучних



систем як здатність до вдосконалення, розвитку системи за умови збереження якісних особливостей. Межі розширення функцій та модернізації повинні бути чітко усвідомленими творцями штучної системи, тому що існують доцільні межі універсальності системи. Можливості для розвитку закладаються шляхом надання системі властивостей до самонавчання, самоорганізації, штучного інтелекту.


Принцип децентралізації орієнтує на розумний компроміс між повною централізацією та наданням здатності реагувати на певні дії частинам системи. Система з повною централізацією буде негнучкою, нездатною до пристосування; ймовірно, що в такій системі інформаційні канали, що ведуть до керуючого елемента, виявляться перевантаженими, а сам керуючий елемент буде нездатним опрацювати таку велику кількість інформації. Однак чим децентралізованішими будуть рішення в системі, тим складніше їх узгодити з точки зору досягнення глобальної мети. Досягнення спільної мети в сильно децентралізованій системі може забезпечуватися лише стійким механізмом регулювання, що не дозволяє сильно відхилитися від поведінки, яка веде до досягнення спільної мети. В усіх таких випадках діє сильний зворотний зв'язок.

В системах, що не мають стійких механізмів регулювання, наявність того чи іншого рівня централізації є необхідністю, і це пов'язане з оптимальним співвідношенням керуючих дій, які отримуються «згори» певним елементом з діями, що продукуються цим елементом самостійно.

Загальне правило є наступне: *ступінь централізації повинен бути мінімальним, що забезпечить досягнення остаточної мети.*

Окрім того є ще один аспект централізації та децентралізації: «згори» надходять узагальнені керуючі дії, які конкретизуються на нижніх рівнях. Оскільки конкретизація можлива неєдиним способом, то нижні рівні отримують ще один «ступінь свободи». Хоча, з іншого боку, з точки зору верхнього рівня, деякі керуючі дії загального характеру можуть бути неправильно проінтерпретовані нижнім рівнем.

Принцип невизначеності стверджує, що в багатьох (більшості, коли це стосується штучних систем за участю людини) випадках ми працюємо з системою, про яку ми не все знаємо, чи не все розуміємо у її поведінці. Це може бути система з невідомою структурою, непередбачуваним перебігом деяких процесів, зі значними відмовами, з невідомими зовнішніми втручаннями. Частковим випадком невизначеності є випадковість - ситуація, коли вид події відомий, але вона може трапитися, або ж ні. На ґрунті такого означення можна ввести поле подій - множину подій, про яку відомо, що якась з подій, що належать до цієї множини, обов'язково трапиться. Врахування невизначеності в системі можливо як на ґрунті принципу гарантованого результату, так і



спробою описання за допомогою методів теорії ймовірності та математичної статистики або ж лінгвістичних змінних, а підвищення рівня надійності досягається шляхом введення резервування.

*Принципи системного підходу є загальними положеннями, що відображають абстраговані від конкретного змісту прикладних проблем відношення.*

Тому цілком послідовним є запитання: «Яким чином застосувати такі знання?»

*Для конкретної системи чи проблемної ситуації принципи системного підходу повинні бути конкретизовані, тобто насамперед повинна бути дана відповідь на запитання: «Що означає той чи інший принцип у цій предметній області та в цій конкретній ситуації?»* Наповнення принципів конкретним змістом виконується системним аналітиком. Це дозволяє у випадку складних систем краще побачити суттєві особливості проблеми, врахувати важливі взаємні зв'язки. В багатьох випадках інтерпретація системних принципів в конкретних умовах дозволяє піднятися на новий рівень розуміння системи загалом, вийти за межі розгляду її «зсередини». Така інтерпретація може приводити до висновків про відсутність умов для застосування деяких з принципів або їх незначного впливу в певних конкретних умовах.

Багаторазове застосування принципів системного підходу в різних системах приводить до розвитку у дослідника особливого, системного типу мислення. Саме тому результати застосування системних принципів та методологій є певною мірою мистецтвом і вимагають системноаналітичного досвіду

## **1.7 Види та методи системного аналізу**

*Прикладний системний аналіз* – це наукова дисципліна, яка на основі системно організованих, структурно взаємозалежних та функціонально взаємодіючих евристичних процедур, методологічних засобів, математичного апарата, програмного забезпечення та обчислювальних можливостей комп'ютерних систем забезпечує в умовах невизначеності одержання та нагромадження інформації про предмет, що досліджується, для наступного формування знань про нього як про єдиний, цілісний об'єкт з позиції поставлених цілей дослідження та ухвалення раціонального рішення в умовах різномірних багатофакторних ризиків.

*Системний аналіз (СА)* створює додаткові можливості для наукового обґрунтування варіантів рішень та істотно підвищує якість

вибору рішення. Застосування системного аналізу дозволяє вирішувати складні різноманітні завдання, зазначати вірне рішення з ряду альтернатив.

Застосування методів та принципів системного аналізу при рішенні завдань, як правило, проводиться шляхом виконання низки процедур. При цьому необхідно:

- окреслити, сформулювати проблему;
- дослідити все те, що має відношення до поставленого завдання;
- скласти уявлення про внутрішню структуру проблеми;
- визначити методи структуризації, оцінки та вибору варіантів рішень, а також послідовність їхнього застосування;
- провести побудови, розрахунки тощо;
- обґрунтувати та здійснити вибір технічного рішення.

При дослідженні технічної системи з позицій системного аналізу необхідно (рис. 1.1):

- розглянути середовище, у якому розвивається дана система;
- простежити та охарактеризувати систему з історичної точки зору в динаміці її розвитку.

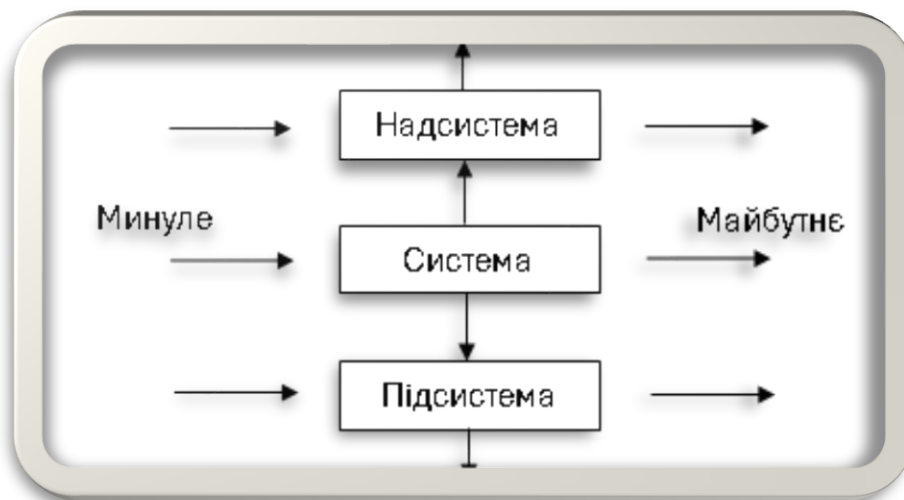



Рисунок 1.3 - Рівні та історичний підхід до розгляду системи

При проектуванні виробів нової техніки системний дослідник повинен сформулювати цілі створення виробу та сформулювати цільові функції на основі різноманітної емпіричної інформації. При формуванні цільових функцій потрібно вирішити наступні взаємозалежні завдання:

- приведення вхідної інформації до деякого стандартного виду, що забезпечує можливість формування цілей розробки виробу;
- вибір класу та структури функцій при формалізації цілей;
- вибір критеріїв оцінювання та методів побудови функцій;



- знаходження в прийнятому класі функцій, які забезпечують найкраще наближення цільових функцій за обраними критеріями.

Перші три завдання є такими, що не формалізуються, два з них є завданнями вибору в умовах невизначеності. Такі завдання відносяться до категорії найпоширеніших та у той же час самих важких, що постійно зустрічаються на практиці. Складність завдань та труднощі їх рішення обумовлені невизначеністю множини альтернатив та критеріїв вибору. Тому результати їх рішення повністю залежать від спроможностей та умінь дослідника усунути цей недолік. Звідси випливають найважливіші вимоги до здатностей системного дослідника:


- вимоги самооцінювання та самоадаптації – він повинен знати, як використати те, що знає; розуміти, що необхідно додатково знати, чого він не знає; як і де довідатися про те, чого він не знає;

- вимоги оцінювання та формування апарата дослідження – він повинен знати, як використати для досягнення цілей дослідження те, що може виконати наявний інструментарій; розуміти, що необхідно додатково зробити з того, що наявний інструментарій не може реалізувати; визначити, які додаткові інструментальні засоби можуть виконати те, що не може реалізувати наявний інструментарій;

- вимоги оцінювання та формалізації завдання – він повинен знати, як використати для формалізації завдання те, що апріорно відомо; оцінити те, наскільки для формалізації завдання необхідно, можливо та доцільно розкриття наявної невизначеності; виявити те, що необхідно обов'язково зробити, щоб стало можливим розкриття невизначеності при формалізації та рішенні завдання.

Для успішного виконання цих вимог дослідникові недостатньо тільки формального оволодіння системною методологією та досягнення необхідного рівня вміння її раціонально використати на практиці. Від нього потрібно не тільки принципово інше відношення до діяльності, але й принципова зміна стилю мислення, а саме – оволодіння системним мисленням.

*Системне мислення* – це така вища форма людського пізнання, у якій процеси відображення, аналізу, дослідження об'єктивної реальності з позиції досягнення поставлених цілей базуються на вмінні з розрізнених, рознесених у просторово-тимчасовому середовищі матеріальних об'єктів, ситуацій, подій та процесів формувати цілісне уявлення про об'єкт дослідження та на вмінні в умовах концептуальної невизначеності формалізувати та вирішувати завдання його системного дослідження на основі системного використання можливостей математичного та методологічного інструментарію і знань, досвіду, інтелекту та інтуїції дослідника.



Відмінною рисою аналізу систем з позицій СА є багатоаспектність їх розгляду, що пов'язане з використанням наступних видів системного підходу:

- системно-елементний, що відповідає на питання, з яких компонентів утворена система;
- системно-структурний, що розкриває внутрішню організацію системи, спосіб взаємодій утворюючих її компонентів;
- системно-функціональний, що показує, які функції виконує система та утворюючі її компоненти;
- системно-комунікаційний, що розкриває взаємозв'язок даної системи з іншими як за горизонталлю, так і за вертикаллю;
- системно-інтегративний, що показує механізми та фактори збереження, удосконалювання та розвитку системи;
- системно-історичний, що розглядає, яким чином виникла система, які етапи вона проходила у своєму розвитку, та які її історичні перспективи.


Істотне узагальнення підходу до розгляду системи дозволяє застосовувати принципи СА не тільки до технічних об'єктів, але й до соціальних процесів. Таким чином, на базі СА з'явилася можливість розробки загальних методів аналізу та синтезу систем з застосуванням одного апарата логіко-математичного опису, формалізації та графічного подання результатів декомпозиції.

При рішенні завдань системного аналізу використовується низка методів:

- декомпозиція системи;
- діагностика системи;
- математичні методи;
- методи розрахунку економічної ефективності;
- методи нормування витрат;
- методи моделювання;
- методи експертної оцінки: описова експертна оцінка (написання сценаріїв); якісна експертна оцінка; ) кількісна експертна оцінка.

Під *декомпозицією системи* розуміють поділ об'єкта на складові елементи в рамках завдання, створення ієрархії елементів, побудова дерев або графів, зазначення функціональних елементів. При проведенні декомпозиції формулюються проблеми, визначаються їх зв'язки з іншими проблемами, формулюються цілі та альтернативні варіанти рішення.

Діагностика системи здійснюється з метою визначення найбільш чутливих точок системи, визначення елементів, які зручно змінювати в рамках поставленого завдання. Методи діагностики систем дозволяють оцінити рішення, вибрати правильне.



При рішенні завдань системного аналізу також використовують кореляційний аналіз, статистичний аналіз, тобто математичні методи, які дозволяють у деяких випадках описати поведження системи без аналізу фізики процесів, що відбуваються в ній.

Метод нормування витрат пов'язаний з поданням вхідної інформації про вартісні характеристики системи, дозволяє визначити вартість об'єкта на початкових стадіях розробки на основі аналогів та прототипування.

При розгляді системних завдань широко використовується моделювання, що полягає в заміні реальної системи її моделлю з метою вивчення динамічних характеристик системи. Тому моделі повинні відбивати процес роботи (діяльності) досліджуваного об'єкта. Моделі можуть бути подані у вигляді графіків, таблиць, діаграм.

Завданням експертної оцінки є відновлення недоліку інформації про систему у вигляді сценарію розвитку системи. Другим завданням є одержання кількісної оцінки системи. Експерти повинні оцінити задані параметри системи. Після експертної оцінки проводиться обробка результатів. Оцінки експертів обробляються з використанням методів математичної статистики та теорії графів.

## **1.8 Висновки до теми**

Системний аналіз є науковим методом обґрунтування рішень у складних умовах, що базується на дослідженні об'єктів як систем - цілісних, взаємопов'язаних і керованих структур.

Основною метою системного аналізу є забезпечення раціонального вибору рішень з урахуванням множини факторів, невизначеності та ризиків.

Ефективне застосування системного аналізу потребує володіння системним мисленням - умінням розглядати об'єкт у взаємозв'язку його частин, середовища та цілей.

Процес системного аналізу передбачає формулювання проблеми, збір і структурування інформації, розробку моделей, оцінку альтернатив і вибір оптимального рішення.

Отже, системний аналіз є фундаментальною основою наукового підходу до прийняття управлінських, технічних і соціально-економічних рішень.



## ТЕМА 2. ПОНЯТТЯ СИСТЕМИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ

Подальше вивчення системного аналізу неможливе без чіткого розуміння сутності поняття «система» та її основних характеристик. У будь-якій сфері діяльності - технічній, економічній, соціальній чи біологічній - об'єкти можна розглядати як системи, тобто як сукупності взаємопов'язаних елементів, що спільно функціонують для досягнення певної мети.

Знання структури, властивостей і поведінки систем дозволяє визначати закономірності їх функціонування, встановлювати взаємозв'язки між елементами та середовищем, а також створювати ефективні моделі для аналізу та управління.

Класифікація систем має важливе значення, оскільки забезпечує уніфікацію підходів до їх вивчення, дає можливість вибору адекватних методів дослідження та проектування. Саме тому розгляд поняття системи та її класифікацій є фундаментальною основою системного підходу і подальших розділів системного аналізу.

### 2.1 Основні положення теорії систем

Будь-яка діяльність людини або колективу людей переслідує певні цілі. Упорядкована сукупність зв'язаних взаємними відносинами дій, спрямованих на досягнення цілей, називається операцією.


За характером протікання можна зазначити дві групи операцій: термінальні (дискретні) та безперервні.

Термінальні операції завершуються досягненням поставленої цілі за кінцевий інтервал часу, після чого ресурси можуть бути використані в інших операціях. До термінальних операцій відносяться: будівництво будинків, технічних об'єктів, запуск у серійне виробництво нових деталей тощо.

До безперервних операцій відносять масове або серійне виробництво товарів та послуг, торгівля, процеси навчання у школах. У цьому випадку цілі операції періодично повторюються, але стають більш досконаліми.

Під метою розуміють бажаний результат діяльності, досяжний у межах деякого інтервалу часу.

З поняттям цілі тісно пов'язане поняття задачі. Задача – це бажаний результат діяльності за намічений інтервал часу, що характеризується набором кількісних параметрів цього результату.



Таким чином, мета стає задачею, якщо зазначено строк її досягнення та наведені кількісні характеристики бажаного результату. Звичайно мета виступає як більш загальна категорія, ніж задача. Як правило, мета досягається в результаті рішення низки задач.

Операції великого масштабу завжди можна подати у вигляді багаторівневої ієрархічної сукупності операцій меншого масштабу. Відповідно розподілу операцій на їх ієрархічну сукупність відбувається розподіл мети та задач операції на ієрархічну сукупність підцілей та підзадач різного рівня ієрархії. Розподіл відбувається до рівня елементарних задач, достатніх для розгляду системи. Ці задачі характеризуються єдиним стійким способом їх рішення при заданих умовах.

## 2.2 Поняття системи. Властивості систем

*Система* – це цілісна множина об'єктів (елементів системи), зв'язаних між собою взаємними відносинами, у якому якимсь чином визначені цілі.


*Цілісність системи* означає, що система відносно навколишнього середовища виступає та сприймається як щось ціле. Системи можуть мати різний ступінь цілісності, якому відповідає різний ступінь взаємозв'язку між елементами системи.

Системи характеризуються низкою властивостей.

*Стан системи* – це множина значень істотних характеристик (властивостей), якими система володіє в цей момент часу.

*Навколишнє середовище системи* – це множина об'єктів (з їх істотними властивостями), що не входять до системи; при цьому зміна властивостей зовнішніх об'єктів може міняти стан системи. З частиною навколишнього середовища система може взаємодіяти. Зовнішні об'єкти, що не впливають на істотні властивості системи та на які системи також не впливають, не відносяться до середовища. Відповідь на питання, що віднести до середовища, а що до системи, залежить від постановки задачі, мети дослідження. Середовищем для даної системи можуть бути інші системи, які з нею взаємодіють. Для якого-небудь цеху промислового підприємства як системи всі інші цехи підприємства разом з керівництвом є середовищем. Для авіаконструктора літак є системою, а для розроблювача автопілоту системою є автопілот, а літак – середовище, у якому автопілот функціонує.

При описі взаємодії системи з середовищем використовуються поняття входу та виходу системи.



Вплив середовища на систему характеризується деякими параметрами або показниками, які називаються вхідними, або входами. Множина входів може бути подана вектором (2.1):

$$U = (U_1, U_2, U_3, \dots, U_r). \quad (2.1)$$

Входи перетворюються системою в параметри (змінні), які характеризують результати проведених системою операцій, у тому числі її вплив на середовище. Ці параметри називаються вихідними, або виходами.

Множина виходів характеризується вектором (2.2):

$$Y = (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m). \quad (2.2)$$

Система перетворює входи у виходи завдяки деякому відношенню (функції перетворення). У випадку функціонального відношення між входами та виходами маємо залежність (2.3):

$$Y = f(U). \quad (2.3)$$

Тоді моделлю системи «вхід-вихід» буде трійка параметрів (2.4):

$$S = (U, Y, f). \quad (2.4)$$

Наведене вираження ідеалізоване і справедливе у двох випадках:

- система має єдиний стан;
- параметри виходів збігаються з параметрами стану (внутрішніми параметрами системи).

У загальному випадку входи системи визначають параметри її стану (внутрішні параметри) (2.5):

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n) \quad (2.5)$$

через функцію (2.6):

$$W = f(U). \quad (2.6)$$

Вихід системи визначається через функцію (2.7):

$$Y = g(U, W). \quad (2.7)$$

У цьому випадку модель системи визначається п'ятіркою параметрів (2.8):

$$S = (U, W, Y, f, g). \quad (2.8)$$

Для системи в цілому її вхід може трактуватися як причина, а вихід – як наслідок. Для технічних систем характерно їх опис робити у поняттях «вхід – вихід – стан».

*Поведінкою системи* називається зміна її стану, результатом якої є деякий результат. Поведінка системи, таким чином, пов'язана з досягненням мети або рішенням задачі. Щодо технічних систем звичайно говорять не про поведінку, а про процеси в системі. Якщо значення процесу є випадковими, то процес називається випадковим.

*Структура системи* – це те, що залишається незмінним у системі при зміні її стану, при реалізації різних форм поведінки, при здійсненні системою операцій тощо.

Сукупність станів системи та середовища в деякий момент часу називається *ситуацією*.

### 2.3 Класифікація систем

Метою класифікації систем є уніфікація задач вивчення систем, методів їх розгляду, кількісних характеристик систем.

За застосуванням усі системи поділяються на класи (рис. 2.1).

Поділення систем за видом структури представлено на рисунку 2.2.

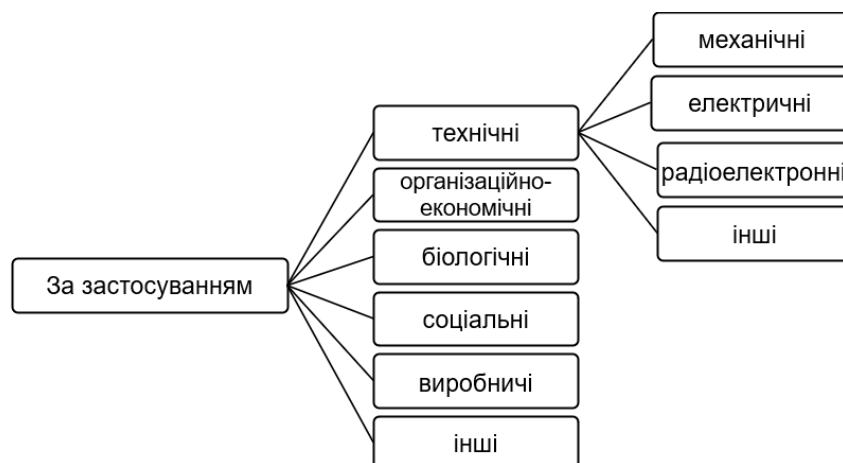


Рисунок 2.1 - Класи систем за застосуванням

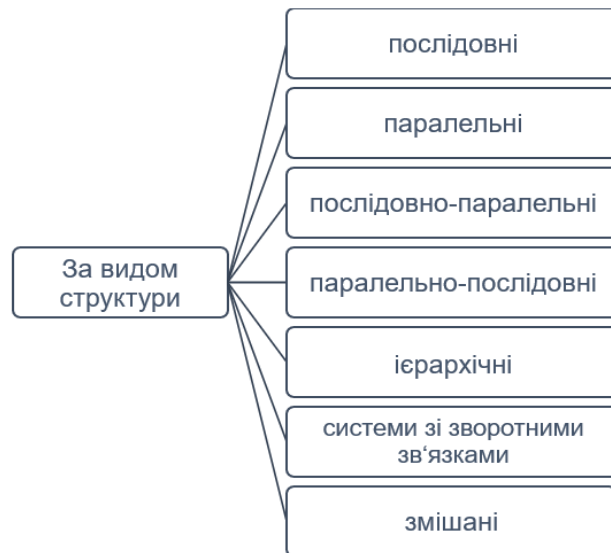


Рисунок 2.2 - Класи систем за видом структури

Види структур системи представлені на рисунку 2.3.

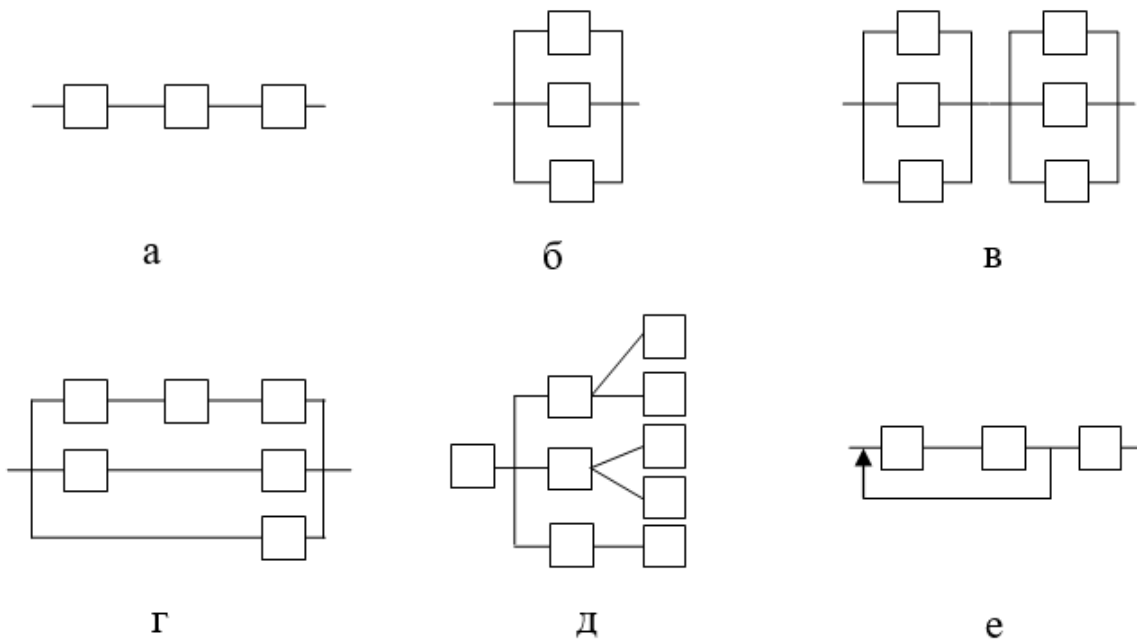


Рисунок 2.3 – Види структур системи а) послідовна; б) паралельна; в) паралельно-послідовна; г) послідовно-паралельна; д) ієрархічна; е) зі зворотним зв'язком



За режимом функціонування системи бувають:

- з одно- та багатопрограмним режимом;
- статичні та динамічні системи (у статичних систем у процесі функціонування кожен блок виконує роботу не більше одного разу; всі динамічні системи звичайно функціонують з багатопрограмним режимом);
- без простоїв і з простоями блоків.

За здатністю до перебудови системи поділяються на:

- постійні – відсутня можливість перебудови;
- змінні – здатні до перебудови.

За дисципліною обслуговування системи поділяються на:

- першим прийшов, першим обслужився (FIFO);
- першим прийшов, останнім обслужився (FILO);
- першим прийшов, середнім обслужився;
- обслуговування за порядком зростання заданого показника;
- обслуговування у випадковому порядку.

За здатністю протистояти відмовам системи поділяються на:

- стійкі – при виникненні відмов у блоках можуть функціонувати, хоча й зі зниженням якості; джерелом стійкості є надмірність, резервування; показником стійкості є максимальна кількість відмов, при якій система працює;
- нестійкі – виникнення відмов у блоках призводить до непрацездатності системи.

## 2.4 Задачі вивчення систем


Задачі вивчення систем досить різноманітні та визначаються класом системи, що досліджується. Існують і універсальні класи задач, що мають важливе значення для багатьох класів систем.

*Подання системи* – подання всієї відомої інформації про систему в компактній формі, що полегшує опис системи, формулювання задач розрахунку, аналізу та синтезу. Це грає особливо важливу роль при розгляді складних систем.

Розрахунок систем полягає у визначенні виражень або чисельних значень різних характеристик функціонування системи за заданими:

- структурою системи;
- режимом функціонування;
- чисельними значеннями параметрів блоків.

Рішення цієї задачі важливо для всіх систем. Для природних (біологічних, соціальних) систем розрахунок розкриває можливості



системи, для штучних систем (технічні, організаційно-економічні системи) – лежить в основі проектування.

Аналіз систем складається у визначенні виду залежності різних характеристик функціонування системи від її структури, режиму функціонування, значень параметрів блоків. Аналіз встановлює ступінь впливу даних факторів на характеристики системи. Завдяки цьому можна вести розрахунки точності (стійкості) функціонування системи при різних змінах з метою досягнення потрібних значень характеристик системи шляхом деякої зміни їх параметрів і структури.

Синтез довільної системи полягає у визначенні її структури, режиму її функціонування за заданими:

- метою системи;
- значеннями параметрів її блоків;
- необхідними значеннями характеристик функціонування системи.

Велика спільність поняття системи веде до значної складності задач, пов'язаних з вивченням систем, при рішенні яких виникає низка проблем.

*Перша проблема* виникає при рішенні імовірнісних задач. Рішення системи припускає знання параметрів блоків системи у вигляді їх імовірнісних розподілів, однак така інформація на практиці, як правило, відсутня. Це ускладнює імовірнісний підхід до вивчення систем.

*Друга проблема* при рішенні імовірнісних задач теорії систем полягає в тому, що рішенню піддаються системи з простою структурою (звичайно паралельною), незважаючи на застосування розвинених математичних методів теорії ймовірностей, теорії випадкових процесів, теорії масового обслуговування.

*Третя проблема* виникає при рішенні детерміністських системних задач. Зв'язана вона з відсутністю єдиного математичного апарата, адекватного цим задачам (використовується множина різноманітних математичних та інтуїтивних методів: комбінаторика, теорія графів, евристика, лінійне та динамічне програмування, пошукові методи та інші).

*Четверта проблема* виникає при рішенні імовірнісних та детерміністських задач дослідження систем. Це проблема розмірності: успішне дослідження складних систем вимагає додаткових (стосовно простих систем) мір, що враховують фактори складності структури системи.



## 2.5 Висновки до теми

Система - це цілісна сукупність взаємопов'язаних елементів, які взаємодіють між собою та з навколишнім середовищем для досягнення спільної мети.

Системний аналіз забезпечує наукове обґрунтування прийняття рішень і дозволяє досліджувати складні об'єкти як єдині цілісні утворення.

Класифікація систем сприяє впорядкуванню підходів до їх аналізу, моделювання та управління.

Розуміння структури, властивостей і поведінки систем є основою ефективного проектування, функціонування та розвитку технічних, економічних і соціальних систем.

Отже, знання сутності та класифікації систем формує базу для застосування методів системного аналізу у вирішенні практичних задач.



## ТЕМА 3. ПОНЯТТЯ МОДЕЛЮВАННЯ. МОДЕЛІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Моделювання є одним із головних методів наукового пізнання, що дозволяє досліджувати складні системи шляхом створення їх спрощених відображень - моделей. Завдяки моделюванню можливо аналізувати властивості системи, прогнозувати її поведінку, визначати оптимальні шляхи розвитку та управління. У системному аналізі моделювання виступає ключовим інструментом для оцінки ефективності рішень, мінімізації ризиків та перевірки гіпотез без необхідності прямого експерименту з реальним об'єктом.


Мета теми полягає у формуванні розуміння сутності моделювання, його ролі у системному аналізі, класифікації моделей складних систем і критеріїв їх адекватності.

### **3.1 Моделювання як спосіб наукового пізнання та його призначення в системному аналізі. Поняття адекватності моделі**

Моделювання як науковий підхід бере свій початок з давніх часів, коли люди почали використовувати абстракції для спрощення та пояснення реальних явищ, щоб краще зрозуміти навколишній світ і передбачати події. Це було особливо важливо в тих галузях, де пряма взаємодія з об'єктами або явищами була неможлива через їхню складність або недосяжність. Люди створювали моделі з метою відображення ключових аспектів реальних систем, і ці моделі допомагали проводити розрахунки або робити прогнози, які виявлялися корисними в повсякденному житті або наукових дослідженнях.

Перші спроби моделювання можна знайти у таких фундаментальних науках, як геометрія, механіка та астрономія. Наприклад, ще у Стародавній Греції Евклід розробив основи геометрії, створюючи абстрактні моделі для опису просторових відносин між об'єктами. Його підхід став основою для подальших наукових досягнень, оскільки дозволяв використовувати спрощені абстракції для вирішення складних геометричних проблем.

У механіці Архімед вперше застосував моделювання для вивчення руху та рівноваги тіл, що дозволило отримати важливі закономірності, які досі застосовуються в інженерії та фізиці. Астрономія, яка також мала витоки в давні часи, широко застосовувала моделі для прогнозування руху небесних тіл. Наприклад, моделі Птолемея, хоч і базувалися на



хібній ідеї геоцентричної системи світу, все ж таки дозволяли доволі точно передбачати розташування планет на небі.

З розвитком науки в епоху Відродження та пізніше, моделювання стало ключовим методом дослідження у природничих науках. Наприклад, Ньютон у XVII столітті розробив математичні моделі для опису руху тіл під впливом сили тяжіння, що стало основою класичної механіки. Це дозволило не лише зрозуміти поведінку тіл на Землі, але й спрогнозувати рух планет і інших небесних об'єктів.

Однак як науковий метод моделювання набуло справжнього значення лише з розвитком математики та фізики у XVIII-XIX століттях. Зокрема, математичні моделі почали широко застосовуватися для опису явищ, які неможливо було дослідити експериментальним шляхом, таких як теплові процеси або рух рідин. Наприклад, рівняння Нав'є-Стокса для руху рідин та рівняння теплопровідності Фур'є є прикладами моделей, що дозволили з високою точністю описувати фізичні процеси.


Справжній прорив у моделюванні відбувся у XX столітті з появою обчислювальних технологій. Раніше моделі часто були обмежені через складність обчислень, але з розвитком комп'ютерів стало можливим моделювати надзвичайно складні системи. Це відкрило нові можливості для аналізу в таких галузях, як економіка, біологія, кліматологія та інженерія. Обчислювальні моделі дозволили проводити симуляції складних процесів, які важко або неможливо експериментально відтворити в реальності. Наприклад, сучасне моделювання кліматичних змін використовує потужні комп'ютери для обробки даних і прогнозування майбутніх сценаріїв розвитку планети на основі взаємодії багатьох факторів.

Таким чином, моделювання стало невід'ємною частиною наукових досліджень, дозволяючи глибше розуміти складні системи та прогнозувати їхню поведінку.

Моделювання використовується для вирішення багатьох завдань у різних галузях науки, техніки та управління, оскільки воно надає інструменти для дослідження складних систем. Завдяки моделюванню можна глибше зрозуміти динаміку процесів та явищ, не вдаючись до ризикованих чи дорогих експериментів. Воно особливо корисне для дослідження об'єктів, що є надто складними або небезпечними для безпосереднього дослідження, а також для аналізу ситуацій, де експерименти можуть бути економічно або технологічно недоцільними.

Є багато прикладів використання моделювання.

В аерокосмічній індустрії моделювання застосовують для розробки та тестування літальних апаратів і космічних кораблів ще до того, як вони будуть побудовані. Це дозволяє вивчати аеродинамічні характеристики, навантаження на конструкції, системи управління і реакцію апарату на



різні фактори (вітер, тиск, температура). Моделювання дозволяє зменшити ризики, пов'язані з експериментальними польотами, та економити ресурси, оскільки випробування у віртуальному середовищі значно дешевші.

В екології моделі використовують для прогнозування наслідків змін клімату та антропогенних впливів на природні екосистеми. Наприклад, кліматичні моделі допомагають досліджувати зміни в атмосфері, температурні коливання, рівень вуглекислого газу та його вплив на глобальне потепління. За допомогою моделей можна оцінити, як певні дії, такі як вирубка лісів чи збільшення промислових викидів, вплинуть на глобальну екологічну ситуацію в майбутньому.

Основні цілі моделювання:

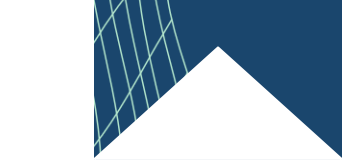
- аналіз і розуміння поведінки складних систем. Моделі дозволяють досліджувати та вивчати системи, які є надто складними для аналізу безпосередньо. Наприклад, у економіці можна моделювати поведінку ринків при зміні обсягу інвестицій, процентних ставок або регулювань. У технічних системах моделі допомагають вивчати процеси в різних галузях інженерії - від розробки нових матеріалів до проектування електронних схем.

- прогнозування: Моделювання використовується для прогнозування майбутніх сценаріїв, що особливо важливо для прийняття управлінських рішень у різних галузях. Наприклад, у макроекономіці моделі допомагають прогнозувати економічні кризи, інфляцію або зростання ВВП. В медицині за допомогою моделювання можна передбачити розповсюдження інфекційних захворювань або ефективність нових ліків на основі біологічних моделей.

- оптимізація: Моделі дозволяють знаходити оптимальні рішення для складних систем. Наприклад, в управлінні виробничими процесами моделювання дозволяє мінімізувати витрати ресурсів, оптимізувати логістичні ланцюги або знайти найефективніший план виробництва. В енергетиці моделювання допомагає оптимізувати розподіл ресурсів і знайти шляхи зменшення втрат енергії.

- візуалізація та спрощення: Моделювання дозволяє візуалізувати складні процеси або явища та спрощувати їх для подальшого аналізу. Візуалізація є особливо важливою для комунікації результатів моделювання, оскільки вона дозволяє представити складні системи у вигляді графіків, схем, діаграм або анімацій, що спрощує сприйняття інформації. У техніці за допомогою 3D-моделювання можна побачити об'єкт із різних ракурсів, дослідити його структуру та оцінити потенційні проблеми ще до його фізичного виготовлення.

В комп'ютерних науках моделювання використовується для створення й аналізу складних інформаційних систем, алгоритмів, мереж



та процесів обробки даних. Один із ключових прикладів - це моделювання комп'ютерних мереж.

Моделювання мереж дозволяє досліджувати різні аспекти роботи мережевих протоколів, поведінку трафіку, навантаження на мережеві ресурси, ефективність маршрутизації тощо, без необхідності фізично розгортати інфраструктуру.

Наприклад, для тестування ефективності нового протоколу маршрутизації в мережах, таких як протокол OSPF (Open Shortest Path First), використовується симуляція роботи мережі в спеціалізованих програмах, таких як NS-3, OPNET або Cisco Packet Tracer. За допомогою цих інструментів можна змодельовати: топологію мережі (розташування вузлів, маршрутизаторів, комутаторів та інших мережевих пристроїв), трафік у мережі (відправка різних типів даних через різні вузли для аналізу пропускної здатності та затримок), аварійні ситуації (можна симулювати збої в мережі, відключення вузлів чи зміни у схемах маршрутизації, щоб оцінити, як протокол реагує на такі виклики).


Мета моделювання:

- аналіз ефективності. Моделювання дозволяє проаналізувати, як новий протокол маршрутизації впливає на загальну продуктивність мережі (затримки, пропускна здатність, надійність) без потреби у фізичній мережі;
- прогнозування навантаження. За допомогою моделювання можна передбачити, як мережа працюватиме при збільшенні кількості користувачів або при зміні топології;
- оптимізація мережі. Можна змодельовати різні сценарії налаштувань мережі та вибрати найкращий варіант для реального розгортання.

До переваг моделювання можна віднести зменшення витрат, тому що, немає потреби розгортати реальне обладнання; безпека, тому що можна випробовувати нові конфігурації без ризику порушити роботу діючих мереж та швидкість тестування - можливість швидко змінювати параметри і тестувати різні сценарії у віртуальному середовищі.

Таким чином, моделювання в комп'ютерних науках дозволяє досліджувати, прогнозувати й оптимізувати роботу систем, що дає змогу значно покращити процеси розробки й підтримки ІТ-інфраструктури.

Таким чином можна сказати, що моделювання є одним із способів пізнання. Моделювання слугує для розв'язування тих завдань, які не можуть бути розв'язані безпосередньо на об'єкті, наприклад коли він не існує. Метод моделювання полягає в заміні деякого об'єкта іншим об'єктом, який володіє подібними властивостями, але дослідження якого економічно вигідніше. Тобто методи моделювання є одним із способів



опосередкованого пізнання. Моделювання це завжди є співставлення відомого з невідомим по аналогії.

Аналогія це твердження про схожість в різних об'єктах. Ґрунтуючись на аналогії в дослідженнях висуваються гіпотези-передбачення, які перевіряються шляхом експерименту.

Модель є провідною ланкою між дослідником та об'єктом, виконує функції замітника об'єкта та дозволяє отримати нові знання про цей об'єкт.

При моделюванні можливі різні рівні аналогій. Найвищий рівень аналогії - коли модель тотожна самому об'єкту. Однак в цьому випадку втрачається зміст моделювання. З іншого боку надмірне спрощення моделі призводить до невідповідності із досліджуваним об'єктом.

Основними функціями моделей систем є пізнавальні та прагматичні.

Вони можуть використовуватися як засоби:

- осмислення дійсності;
- формального опису причинно-наслідкових зав'язків та структури системи;
- навчання, імітації та прогнозування поведінки системи;
- імітаційного експерименту;
- використання в задачах управління та оптимізації.


Системний аналіз використовує апарат моделювання для розв'язування задач дослідження об'єкта, проектування нової системи та організації управління. При цьому властивості системи переважно відображаються комплексом моделей.

Інший системний аспект моделювання полягає в тому, що діяльність дослідника є цілеспрямованою на досягнення певної мети, бажаного стану, який розглядається як деяка модель. Процес формування плану чи алгоритму діяльності базується на моделюванні з метою прогнозування наслідків діяльності. В цьому сенсі моделювання виступає як обов'язкова дія в цілеспрямованій діяльності.

Модель також виступає як цільове відображення властивостей об'єкта, тобто відображаються ті властивості, які відповідають основній цілі.

Прагматичний аспект моделювання полягає в тому, що його результатом є не тільки відображення властивостей, але і формування вимог до того що потрібно досягнути, тобто до бажаного стану системи. Наприклад моделі можуть використовуватись як засіб знаходження оптимальних рішень, оптимального управління, оптимальної організації, тощо.

Основними властивостями моделі є її *скінченність (повнота)*, *складність (спрощеність)* та *точність (наближеність)* по відношенню до реальної системи.



У моделі відображається скінчена кількість відношень елементів системи. Хоча об'єкти моделювання можуть бути також скінченими. Наприклад, коли будується модель якоїсь моделі (на основі комп'ютерної моделі будується її відображення в аналітичному виразі).

Спрощеність моделі обґрунтовується необхідністю оперування нею, наприклад, із застосуванням обчислювальної техніки, ресурси якої є обмеженими. Принцип леза Оккама гласить, що з двох адекватних моделей ближчою до дійсності природи явища є та, що простіша. Простота – це печать істини (древні схоласти).

Оцінка складності моделі досліджується при визначенні структури моделі (структурної ідентифікації). Кількісні оцінки складності можуть бути отримані тільки для фіксованого класу моделей. Наприклад, вони можуть визначатися кількістю елементів, згідно алгоритмічної чи обчислювальної концепції. Тобто згідно концепцій визначення складності систем.

Наближеність (точність) моделей має більш кількісне вираження ніж скінченність та складність. Для перевірки наближеності достатньо порівняти властивості отримані згідно моделі із властивостями оригіналу.

Адекватність є основною характеристикою побудованої моделі. Модель адекватна об'єкту якщо результати моделювання слугують для прогнозування поведінки реального об'єкта.

Поняття адекватності слугує для оцінки рівня виконання вимог повноти та точності, необхідного для досягнення мети моделювання. Ступінь адекватності моделі перевіряється експериментальним шляхом на основі введення міри адекватності.

В цілому існує розумний компроміс між складністю моделі та адекватністю відображення нею властивостей об'єкта. Як правило при цьому модель описує деякі сторони функціонування та деякі необхідні для відображення властивості системи.


Процес моделювання пов'язаний із виконанням певних етапів дослідником результатом кожного з яких є певні системи знань або їх знакове (формальне) відображення.

На першому етапі отримується відображення об'єкта у свідомості дослідника у вигляді системи знань. Це відображення є гомоморфним.

Гомоморфне відображення означає, що кожному елементу та зв'язку об'єкта, що моделюється, відповідає один елемент та зв'язок системи знань про об'єкт у свідомості дослідника, а протилежне відображення не існує.

На другому етапі отримується система уявлень про модель об'єкта, яка також є гомоморфним відображенням системи знань про об'єкт.

На третьому етапі система уявлень про модель об'єкта ізоморфно відображається у модель об'єкта чи явища, що моделюється. Ізоморфізм вказаного відображення полягає у тому, що кожному елементу та зв'язку



системи уявлень про модель об'єкта відповідає один і тільки один елемент моделі об'єкта і існує протилежне відображення.

В цілому між системою (об'єктом, що моделюється) і її моделлю існує гомоморфне відображення, що підтверджує множинність моделей будь-якої системи, а процес моделювання є ітераційним.

### 3.2 Класифікація моделей

Основними класифікаційними ознаками моделей є:

- акценти дослідження системи;
- властивості областей зміни параметрів та змінних;
- спосіб опису невизначеності;
- урахування інерційності;
- спосіб задання відношень між параметрами та змінними;
- призначення;
- форма представлення властивостей системи.

Якщо акценти при дослідженні системи зміщуються в напрямку пізнання внутрішньої побудови системи, то розглядають моделі структури. У випадку, коли найважливішим є встановлення властивостей системи які проявляються при взаємодії її із зовнішнім середовищем, то розглядають *моделі чорної скриньки («вхід-вихід»)*.

Моделі «вхід-вихід» відображають основні властивості системи, ізолюваність і зв'язок із зовнішнім середовищем, а також неможливість повної ідентифікації всіх властивостей.

Модель структури відображає сукупність елементів і зв'язків між ними як відносно незмінну.


Залежно від властивості областей зміни параметрів та змінних моделі поділяють на *неперервні (аналогові), дискретні та дискретно-неперервні*.

У *неперервних моделях* елементи моделі є неперервними. У *дискретних моделях* – параметри та змінні приймають значення з дискретних множин.

Залежно від опису невизначеності моделі поділяють на: *детерміновані, стохастичні та теоретико-множинні*.

*Детерміновані моделі* – не містять невизначеності і є певним ідеалом. Навіть у випадку відсутності стохастичних чи непередбачених процесів у кожній моделі існує певна міра невизначеності, пов'язана із такими її властивостями як скінченність та наближеність.

У *стохастичних моделях* змінні та параметри представляються випадковими величинами. Характеристиками цих випадкових величин є



закони розподілу чи їх параметри, або статистичні оцінки цих законів і параметрів.

*Теоретико-множинні моделі* містять параметри та змінні, представлені у вигляді множин гарантованих чи допустимих значень, або у вигляді нечітких множин із відомими функціями належності. Одним із підкласів таких моделей є *інтервальні моделі* які описують властивості системи інтервалами можливих значень, або функціональними коридорами.

Залежно від ступеня урахування фактору часу моделі поділяються на *статичні (без інерційні)* та *динамічні*.

У *статичних моделях* припускається відсутність перехідного процесу. Тобто, що система миттєво реагує на будь-яке збурення. *Статичні моделі* описуються алгебраїчними рівняннями. *Статичні моделі* можуть також відображати динаміку, але в фіксований момент часу. Послідовність статичних моделей може повністю описати зміну станів системи у часі. У цьому випадку використовують рекурентні співвідношення у вигляді різницевих рівнянь.

*Динамічні моделі* враховують фактор інерції системи при поведінці системи. Такі моделі описуються інтегро-диференціальними рівняннями із змінною часу.

За способом задання відношень між параметрами та змінними моделі поділяються на *лінійні* та *нелінійні*. *Лінійні моделі* як правило описують прості системи, що не володіють властивістю синергізму, або за значного спрощення при відображенні властивостей системи.

За призначенням моделі поділяють на *дескриптивні* та *нормативні*. *Дескриптивні моделі* – це описові моделі. *Нормативні моделі* – включають критерії оцінки якості функціонування системи. Такими моделями є оптимізаційні моделі. *Нормативні моделі* описують норми функціонування системи і обов'язково включають дескриптивні моделі.


В залежності від форми представлення властивостей системи моделлю виділяють: *мисленні* та *реальні моделі*.

*Мисленні моделі* відображаються аналоговими, макетування, знаковими

В *аналогових моделях* властивості системи представляються іншою властивістю аналогічної за поведінкою моделі.

*Макетування*, це відображення властивостей системи за допомогою макету – спрощеного образу системи.

*Знакове моделювання* – це процес створення логічного об'єкту в заміні реального за допомогою певної системи знаків або символів. Знакові моделі є формальними. Тобто усі властивості системи описуються строго формальною мовою, що дозволяє уникнути подвійного трактування опису.



Серед знакових виділяється *математичне моделювання*, яке є процесом встановлення відповідності між реальною системою і математичним об'єктом.

*Математичні моделі* поділяються на *аналітичні* та *імітаційні*.

*Аналітичне математичне моделювання* передбачає запис процесів функціонування системи у вигляді співвідношень інтегродиференціальних та алгебраїчних виразів.

*Імітаційне моделювання* – реалізація моделі або сукупності моделей системи за допомогою алгоритму, який відтворює процес функціонування системи в часі, тобто її динаміку.

*Реальне моделювання* – дослідження характеристик системи на реальній системі, або на її подібній частині. З реальним моделюванням пов'язані процеси експериментального дослідження системи, натурний та науковий експерименти, комплексні випробовування

Підставою для класифікації моделей є мета моделювання. Цільова орієнтація моделей дозволяє класифікувати їх за типами цілей, за способами відтворення (реалізації), за етапами життєвого циклу.

За типами цілей розрізняють моделі *пізнавальні* та *прагматичні*.

За довжиною в часі розрізняють моделі *статичні* та *динамічні*.


За способами відтворення розрізняють моделі *ідеальні* (*абстрактні*) та *матеріальні* (реальні, речовинні).

Розходження *пізнавальних* та *прагматичних моделей* проявляється в їх відношенні до оригіналу в процесі діяльності.

*Пізнавальні моделі* є формою організації та подання знань, засобом з'єднання нових знань з наявними. Якщо в процесі створення пізнавальної моделі деякого реального об'єкта спостерігаються розбіжності, то здійснюється корекція моделі з метою наблизити її до реальності. Прикладом пізнавальних моделей є, власне кажучи, всі наукові теорії, які розвиваються та удосконалюються в міру виявлення невідповідності старих моделей реаліям миру.

*Прагматичні моделі* є засобом керування практичними діями, способом подання необхідних дій або їх результату, тобто є робочим поданням мети. Тому у випадку виявлення розбіжності між прагматичною моделлю та реальним об'єктом основні зусилля мають бути спрямовані на корекцію (зміну) реальності. Прагматичні моделі носять нормативний характер, виконують роль стандарту, зразка, під який підганяються реальні об'єкти. Прикладом таких моделей служать програми, устами, кодекси законів, креслення тощо.

Моделі складних систем є важливим інструментом для аналізу та дослідження реальних об'єктів, процесів та явищ. У системному аналізі моделі використовуються для спрощення складних систем шляхом абстрагування певних аспектів реальності. Це дозволяє краще зрозуміти



сутність цих систем, аналізувати їхні властивості, взаємодії та поведінку, а також прогнозувати можливі зміни у відповідь на зовнішні впливи.

Усі природні та штучні системи можна описати за допомогою обмеженої кількості типів моделей. Такі моделі називають *формальними моделями*, оскільки вони описують систему за допомогою математичних чи логічних засобів. *Формальні моделі* мають високий рівень абстракції, що дозволяє описати великий спектр різних систем за допомогою універсальних підходів. Зазвичай, формальні моделі слугують шаблоном, на основі якого дослідник розробляє конкретну модель для аналізованої системи, враховуючи її специфіку.

Рівень абстракції у цих моделях може бути різним. Чим вищий рівень абстракції, тим ширший клас систем може бути охоплений. Наприклад, прості моделі з високим рівнем абстракції можуть описувати як технічні, так і біологічні системи, зводячи їхні складні характеристики до базових принципів взаємодії. З іншого боку, моделі нижчого рівня абстракції детальніше описують внутрішню структуру системи, даючи змогу досліджувати специфічні механізми, що лежать в основі її функціонування.

В системному аналізі виділяють чотири основні типи формальних моделей високого рівня абстракції, які використовуються для аналізу складних систем.

*Модель «чорний ящик»* - описує систему тільки через її зовнішні характеристики та взаємодії з оточенням, без розкриття внутрішніх процесів. Вхідні та вихідні параметри є основою для аналізу.

*Модель «состав системи»* - акцентує увагу на складових елементах системи. Вона показує, з яких підсистем або компонентів складається система, але не деталізує їхню внутрішню структуру чи взаємодії.

*Модель «структура системи»* - деталізує взаємозв'язки між компонентами системи. Вона фокусує увагу на тому, як елементи системи взаємодіють між собою, та дозволяє зрозуміти архітектуру системи.

*Структурна схема системи (модель «білий ящик»)* - описує як зовнішні, так і внутрішні процеси системи, зокрема механізми її функціонування, що дає змогу повністю розкрити внутрішню структуру і принципи дії системи.

У наступних підрозділах розглянемо кожен із цих типів моделей докладніше, щоб зрозуміти, як їх можна використовувати для аналізу складних систем, та які переваги вони надають при дослідженні різних класів систем.

### 3.3 Модель «Чорний ящик»

Формальна модель системи виду «чорний ящик» подана на рисунку 3.1. Вона включає наступні компоненти:

- межі системи;
- входи системи;
- виходи системи;
- навколишнє (зовнішнє) середовище.

Ця модель є вихідною при побудові моделі складної системи та акцентує увагу дослідника на взаємодії системи з зовнішнім середовищем. Ця взаємодія здійснюється на основі впливу цілей системи на зовнішнє середовище.

Цільові продукти системи – це виходи системи. Зовнішнє середовище впливає на систему через ресурсне забезпечення, що дозволяє системі реалізувати свої цільові функції. Такі зв'язки зовнішнього середовища з системою називають входами системи. Сама система зображується у вигляді прямокутника («непрозорого ящика»), причому зміст цього ящика не розкривається. Параметри внутрішнього стану системи не розглядаються. Тому модель і називається «чорним ящиком». Тут увага звертається тільки на межі системи, які підкреслюють цілісність системи та відособленість її від зовнішнього середовища.

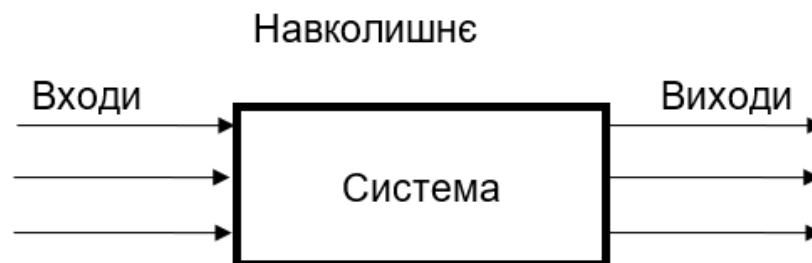
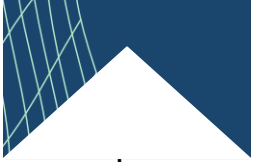


Рисунок 3.1 – Модель «Чорний ящик»

Однак простота цієї моделі на практиці обертається значними складностями. Кількість відносин реальної системи з зовнішнім середовищем дуже велике (практично нескінченне). Це відноситься як до факторів зовнішнього середовища, які впливають на функціонування системи і виступають у вигляді входів системи, так і до факторів впливу системи на зовнішнє середовище, які виступають у вигляді виходів системи. Тому при побудові моделі дослідник відбирає з цієї множини



тільки деяке їхнє число, що включається до списку входів і виходів. Критерієм відбору служить цільове призначення моделі, значущість того або іншого фактору з погляду реалізації цілей моделювання. Слід зазначити, що при формуванні списку входів і виходів моделі системи виключення низки факторів з розгляду не призводить до їх зникнення на практиці. Тому помилки, допущені на цьому етапі побудови моделі, можуть мати надалі непередбачені наслідки.

Модель «Чорний ящик» звичайно розглядається як перший етап моделювання об'єкта. Математичним апаратом для моделювання таких систем є регресійний аналіз.

Модель «Чорний ящик» широко використовується в різних галузях, особливо тоді, коли досліднику не потрібно або неможливо аналізувати внутрішню структуру системи. Такий підхід дає змогу зосередитись на вхідних і вихідних параметрах системи та взаємодії із зовнішнім середовищем. Розглянемо детальніше приклади її практичного застосування в різних сферах.


В електронних системах модель «Чорний ящик» використовується для аналізу різних електронних компонентів і пристроїв. Основним підходом є розгляд пристрою лише за його зовнішніми характеристиками - вхідними та вихідними сигналами, не заглиблюючись у внутрішню структуру компонентів.

Наприклад, при тестуванні електронних приладів, наприклад, посилювачів сигналу, на вході подаються електричні сигнали певної амплітуди, а на виході отримують посилений сигнал. Модель «Чорний ящик» дозволяє оцінювати якість роботи приладу на основі таких вхідних і вихідних сигналів без потреби аналізувати внутрішню схему посилювача або деталі його функціонування (наприклад, напівпровідникові елементи або резистори).

Це корисно в практичних застосуваннях, коли важливо оцінити роботу пристрою, але немає потреби або можливості розуміти, як саме пристрій реалізує ці функції. Такий підхід також використовується в проєктуванні й тестуванні мікропроцесорів, блоків живлення, датчиків і інших компонентів.

Модель «Чорний ящик» також застосовується в економічному аналізі, де вона дозволяє розглядати складні економічні системи без необхідності дослідження їхньої внутрішньої структури. Замість цього увага зосереджується на зовнішніх параметрах, таких як грошові потоки, виробництво, споживання, та їхньому впливі на систему.

Наприклад, національна економіка може бути представлена як система «Чорний ящик», де вхідними параметрами є ресурси, імпорт, інвестиції та інші показники, а вихідними параметрами - валовий внутрішній продукт (ВВП), рівень інфляції, зайнятість населення тощо.



Економісти можуть аналізувати, як зміни в податковій політиці або міжнародній торгівлі (входи) впливають на економічне зростання (виходи), не розглядаючи внутрішні деталі взаємодії між різними секторами економіки.

Модель макроекономіки країни може бути побудована за принципом «Чорного ящика», що дозволяє оцінювати ефективність економічної політики або прогнозувати наслідки глобальних економічних потрясінь.

Наприклад, підвищення процентної ставки центрального банку призводить до зниження інфляції, але як саме це відбувається всередині економічної системи може бути не настільки важливим у певних моделях, де досліджують лише вхід і вихід.

У сфері машинного навчання, зокрема у нейронних мережах, модель «Чорний ящик» також знаходить своє застосування. Нейронні мережі можуть генерувати певний вихід на основі вхідних даних, але їхня внутрішня робота часто залишається непрозорою для дослідників і користувачів.

Наприклад, нейронна мережа, яка використовується для класифікації зображень (наприклад, розпізнавання обличчя або класифікація об'єктів), може бути розглянута як «Чорний ящик». Вхідними даними є зображення, а виходом - класифікований результат (наприклад, «автомобіль», «людина», «дерево»).

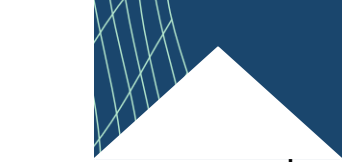
Хоча нейронна мережа використовує складні внутрішні механізми, як-то зважування нейронів і активаційні функції, модель «Чорний ящик» дозволяє досліджувати результативність системи на основі її виходу, не вивчаючи деталі її внутрішньої роботи.

Цей підхід дозволяє успішно використовувати нейронні мережі в додатках для прогнозування чи автоматизації процесів, де не настільки важливо знати, як мережа робить висновки, а важливий сам результат.

У медичних дослідженнях модель «Чорний ящик» може застосовуватися для оцінки ефективності терапії або лікування, коли розглядаються лише зовнішні ефекти, без детального вивчення механізмів дії на молекулярному рівні.

Наприклад, у клінічних випробуваннях нових ліків, модель «Чорний ящик» дозволяє досліджувати ефективність препарату на основі результатів (покращення стану пацієнта), без необхідності вивчати всі складні внутрішні біологічні процеси, що відбуваються в організмі. Вхідні дані - це дози ліків і різні зовнішні умови, вихід - реакція пацієнта, така як поліпшення симптомів абовилікування захворювання. Це дозволяє швидше оцінювати результати лікування.

Таким чином, модель «Чорний ящик» є універсальним інструментом для аналізу систем, які взаємодіють із зовнішнім середовищем, дозволяючи досліджувати їхню поведінку без глибокого аналізу



внутрішніх механізмів. Такий підхід знаходить застосування у багатьох сферах, де акцент робиться на взаємодії системи із зовнішніми факторами, а не на детальному вивченні внутрішньої структури.

Модель «Чорний ящик» часто використовується як початковий етап моделювання складних систем. Це дає змогу досліднику отримати загальне уявлення про систему через її взаємодію із зовнішнім середовищем, зосереджуючись на вхідних і вихідних параметрах без необхідності заглиблюватися у внутрішні механізми. Однак цей підхід має свої обмеження, оскільки не дозволяє досліджувати внутрішні процеси, що можуть бути важливими для точнішого розуміння системи. У таких випадках доцільно переходити до інших моделей, таких як «білий ящик» або модель «структури системи», для глибшого аналізу.

### **3.4 Перехід до моделі «Білий ящик»**


Якщо модель «Чорний ящик» ігнорує внутрішні процеси системи, то модель «Білий ящик» навпаки передбачає детальне вивчення внутрішньої структури системи. У цій моделі відомі всі внутрішні елементи та взаємодії між ними, що дозволяє дослідити, як саме система функціонує зсередини.

Наприклад, при моделюванні програмного забезпечення модель «Чорний ящик» може спочатку використовуватися для тестування загальної функціональності програми (входи - команди користувача, виходи - результати виконання). Після цього дослідник може перейти до моделі «Білий ящик», де він аналізує алгоритми, структуру коду та логіку, щоб виявити можливі помилки або оптимізувати роботу програми.

### **3.5 Модель «Структури системи»**

Модель «структури системи» розглядає не тільки входи і виходи, але також взаємодію компонентів усередині системи. Це дозволяє зрозуміти, як різні частини системи впливають одна на одну, що особливо важливо для складних систем з багатьма підсистемами.

Наприклад, у технічних системах, автомобільній промисловості, на початковому етапі система автомобіля може бути описана за допомогою моделі «Чорний ящик», де досліджується взаємодія автомобіля із зовнішніми факторами (швидкість, витрати палива, викиди).



Але для більш детального вивчення, як різні підсистеми (двигун, гальмівна система, електроніка) взаємодіють між собою, використовується модель «структури системи».

### **3.6 Системна модель з різними рівнями абстракції**

Моделювання систем може відбуватися на різних рівнях абстракції, залежно від того, наскільки детально необхідно дослідити систему. Модель «Чорний ящик» зазвичай має високий рівень абстракції і підходить для першого етапу аналізу, коли необхідно зрозуміти загальну картину. Далі, для глибшого розуміння, використовуються моделі нижчого рівня абстракції, як-то модель «состав системи» або «структурна схема системи».

Наприклад, у системному аналізі економічних систем спочатку модель «Чорний ящик» може описати національну економіку загалом (входи - ресурси, інвестиції; виходи - продуктивність, рівень життя). Якщо виникає потреба детальніше вивчити внутрішню структуру економіки (взаємодію галузей, ринкових сегментів), можна застосувати модель «состав системи» або структурні схеми для глибшого аналізу взаємодії між економічними елементами.


Хоча модель «Чорний ящик» є корисним інструментом для первинного аналізу систем, вона має певні обмеження. Одним із головних недоліків є те, що вона не надає інформації про внутрішні процеси і динаміку системи. Це може призвести до помилок у випадках, коли ці внутрішні процеси мають критичний вплив на кінцеві результати.

Розглянемо основні обмеження моделі.

По-перш, це відсутність інформації про внутрішню структуру: Модель концентрується лише на входах і виходах системи, не розкриваючи механізмів, через які система досягає своїх результатів. Це може бути проблематичним у випадках, коли важливо знати деталі функціонування елементів системи, щоб покращити її ефективність або усунути помилки.

Наприклад, у програмному забезпеченні, використовуючи тільки модель «Чорний ящик», можна протестувати вхідні дані і вихідні результати, але без аналізу внутрішнього коду неможливо виявити проблеми в алгоритмах чи логіці роботи програми.

По-друге, це можливість втрати важливих факторів: Через те, що модель зосереджена лише на взаємодії з зовнішнім середовищем, існує ризик того, що критично важливі внутрішні фактори не будуть враховані, оскільки вони не проявляються безпосередньо на виходах.



Наприклад, в економічній системі модель «Чорний ящик» може ігнорувати взаємодії між різними секторами економіки, що можуть мати суттєвий вплив на загальні економічні результати, такі як інфляція або безробіття.

По-третє, невідповідність для динамічних систем: Модель «Чорний ящик» погано підходить для аналізу динамічних або складних нелінійних систем, де важливо розуміти змінні і залежності між внутрішніми компонентами. У таких випадках ця модель може дати лише поверхневий результат, який не відображає справжньої суті процесів.

Наприклад, у технічних системах, таких як енергосистеми або реактивні двигуни, внутрішні динамічні процеси, зокрема теплові або гідравлічні параметри, можуть значно вплинути на вихідні результати, ігнорування яких може призвести до неточних прогнозів або проектування системи.

Таким чином, модель «Чорний ящик» є корисною для загального аналізу та розуміння взаємодії системи з зовнішнім середовищем, але її обмеження у розгляді внутрішніх процесів роблять її непридатною для детального аналізу складних, динамічних чи нелінійних систем. Тому, після побудови цієї моделі, часто доводиться переходити до детальніших моделей, таких як «білий ящик» або модель «структури системи», щоб забезпечити повне розуміння функціонування системи.

### **3.7 Модель «Склад системи»**

Розглядаючи систему як щось цілісне та відокремлене від зовнішнього середовища, дослідник описує зовнішні властивості системи (стосовно навколишнього середовища). Сама ж система, її внутрішня побудова, є, як правило, неоднорідною, що викликає необхідність розрізняти внутрішні частини, тобто структурувати систему (виконати декомпозицію системи на окремі елементи). Рівень або глибина структуризації залежать як від самої системи, так і від цілей, що стоять перед дослідником.

У системі розрізняють елементи та підсистеми різних рівнів. Підсистеми складаються з наборів елементів. Формальна модель «Склад системи» показана на рисунку 3.2.

Побудова змістовної моделі системи на практиці виявляється досить непростим завданням. Конкретний вид моделі «состав системи» буде залежати:

- від цілей моделювання;
- від ступеня компетентності суб'єкта моделювання;

- від рівня інформованості суб'єкта моделювання та фахівця-консультанта (експерта);
- від необхідної глибини структуризації системи, що моделюється.

Наприклад, з погляду анатома, система «людина» складається з наступних основних підсистем:

- кістково-м'язової;
- дихальної;
- сечостатевої;
- нервової;
- ендокринної;
- серцево-судинної;
- органів почуттів.

У свою чергу, кістково-м'язова підсистема включає дві підсистеми другого рівня: кістяк і м'язи. Структуризація кістяка за підсистемами більш низьких рівнів (хребет, передпліччя, череп тощо) приводить, наприклад, до такого елемента кістяка, як окрема кістка (їх у кістяку 206).

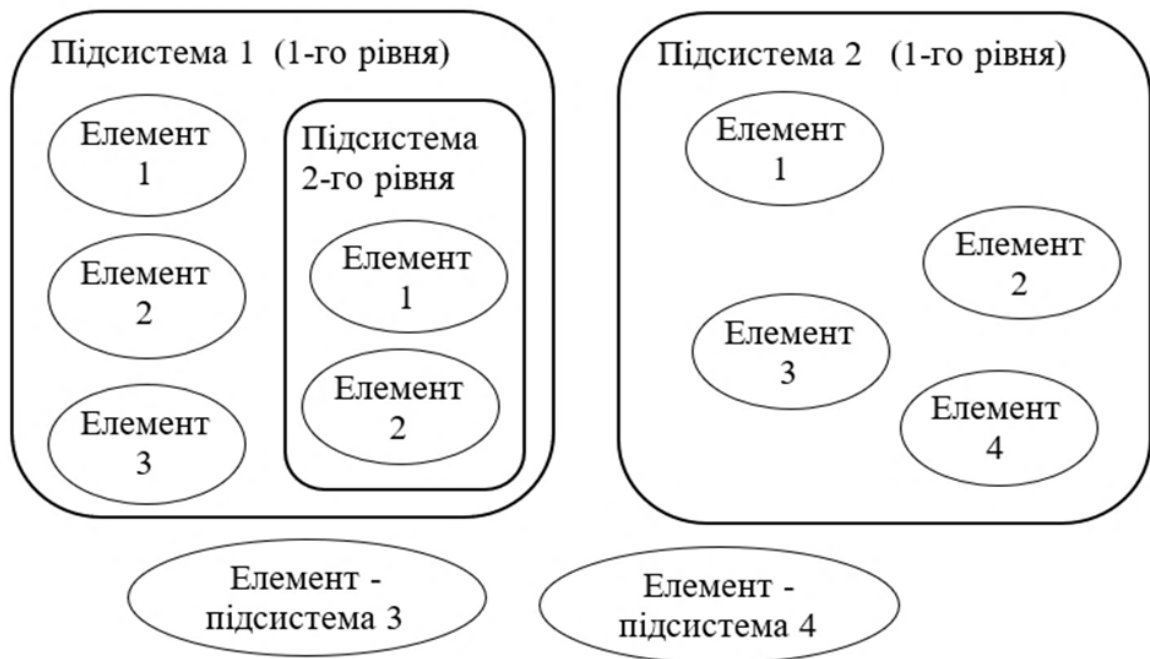


Рисунок 3.2 – Модель «Склад системи»

При побудові моделі «Склад системи» виникає питання, що вже розглядалося при побудові моделі «чорний ящик». Це питання про межі системи. Модель «Склад системи» повинна відповісти на нього більш виразно, ніж модель «чорний ящик», хоча це буває зробити непросто.



### 3.8 Модель «Структура системи»


Реальна кількість зв'язків між будь-якими системами або їх елементами настільки велика, що може вважатися нескінченною. Однак при побудові пізнавальних та прагматичних моделей систем для досягнення намічених цілей використовуються ті зв'язки, вплив яких можна або оцінити, або наявність яких забезпечує необхідний рівень адекватності моделей. Природно, що розглядати модель «Структура системи» безвідносно до сукупності елементів системи (моделі «Склад системи») неправомірно. Тому ця модель будується тільки після або разом з моделлю «Склад системи».

Звичайне поняття «структура» зв'язує з графічним відображенням, однак це необов'язково. Структура може бути також подана в матричній формі, у формі теоретико-множинних описів, за допомогою мови топології, алгебри та інших засобів моделювання систем. Та сама система може бути подана різними структурами залежно від стадії пізнання об'єкта або процесу їх розгляду, цілей створення. При цьому в процесі дослідження або проектування структура системи може змінюватися.

Модель «Структура системи» є однією з ключових у системному аналізі, оскільки вона дозволяє описати взаємозв'язки між елементами системи. У реальних системах кількість зв'язків між елементами або між самими системами може бути настільки великою, що її важко осягнути в повному обсязі. Однак для створення моделі важливо зосередитися на тих зв'язках, які є найбільш значущими з точки зору досягнення поставлених цілей дослідження. Це дозволяє забезпечити адекватність моделі і зробити її придатною для аналізу та прогнозування поведінки системи.

Модель «Структура системи» тісно пов'язана з моделлю «Склад системи», яка описує окремі елементи системи. Важливо розуміти, що «структура» є не просто набором елементів, а описом їхніх взаємодій і взаємозв'язків. Тому ці дві моделі часто розглядаються разом, оскільки неможливо зрозуміти структуру без знання складу системи. Це забезпечує можливість переходу від загального опису до більш детального аналізу поведінки кожного компонента і його ролі у функціонуванні всієї системи.

Структура системи може бути подана в різних формах залежно від того, яку мету переслідує дослідник. Хоча графічні схеми є найбільш інтуїтивно зрозумілими і часто використовуються для наочного відображення зв'язків між елементами, це не єдиний спосіб представлення структури. Інші форми включають:

- 
- матричні форми: Для систем із великою кількістю взаємодій матриці можуть бути ефективними для опису зв'язків між елементами. Наприклад, у матриці суміжності графа можна відобразити, які елементи системи взаємодіють один з одним і наскільки тісно;
  - теоретико-множинні описи. Використовуються для абстрактного опису структури за допомогою множин і відображень між ними. Це може бути корисно для опису складних математичних або логічних структур;
  - топологічні моделі. Застосовуються, коли важливо відобразити просторові або геометричні аспекти структури системи, що часто зустрічається в фізичних або біологічних системах;
  - алгебраїчні методи. Використовуються для опису зв'язків між елементами через операції над цими елементами, що часто зустрічається в системах з чіткими правилами взаємодії, наприклад, у комп'ютерних системах або програмних моделях.


Структура системи не є статичною. Залежно від того, на якому етапі дослідження знаходиться дослідник, а також від його цілей, структура може змінюватися або уточнюватися. На початковому етапі структура може бути дуже спрощеною, щоб дати загальне уявлення про систему. У процесі більш детального вивчення система може бути представлена через різні структури, що дозволяє враховувати нові взаємозв'язки або уточнювати існуючі.

Наприклад, при проектуванні складних технічних систем, таких як автомобіль або літак, спочатку можуть бути побудовані спрощені структурні моделі для вивчення основних елементів і їхніх взаємодій. У подальшому, у міру розвитку проекту, моделі стають складнішими, і дослідники додають нові компоненти або детально розробляють взаємодії вже відомих елементів.

Структура системи не є незмінною. У процесі функціонування системи або її розвитку структура може змінюватися. Це особливо важливо для адаптивних або самонавчальних систем, де зв'язки між елементами можуть змінюватися залежно від зовнішніх впливів або внутрішніх умов. У таких випадках структура моделі також повинна бути динамічною і враховувати зміни, що відбуваються в системі.

Наприклад, у комп'ютерних мережах, які постійно адаптуються до змін у навантаженні або інфраструктурі, структура мережі може змінюватися в режимі реального часу. Спочатку мережа може бути змодельована як статична система, але в міру функціонування її структура підлаштовується до нових умов, наприклад, шляхом динамічної маршрутизації трафіку.

У складних інженерних системах, таких як літальні апарати або великі промислові об'єкти, модель «Структура системи» може використовуватися для відображення взаємодій між підсистемами -



наприклад, взаємодії між двигуном, паливною системою та навігаційною системою.

У соціології модель структури системи може описувати взаємодію між різними соціальними групами або інститутами. Структура може бути подана у вигляді соціальних мереж, де кожен елемент - це людина або організація, а зв'язки між ними відображають взаємодію, наприклад, обмін інформацією або ресурсами.

Тобто, модель «Структура системи» є необхідною для опису складних систем та їхніх елементів, що взаємодіють. Вона може бути подана в різних формах і на різних рівнях абстракції, залежно від цілей моделювання і етапу дослідження. Її гнучкість дозволяє адаптувати модель до потреб дослідника і забезпечити адекватний аналіз системи як у статичному, так і в динамічному аспекті.

### **3.9 Модель «Структурна схема»**

Завершальною та найбільш повною моделлю системи є модель, названа «структурною схемою системи», що являє собою сукупність (з'єднання) трьох перелічених вище моделей: «чорного ящика», складу та структури системи. У цій моделі описуються:

- усі елементи системи (склад);
- усі зв'язки системи: внутрішні (структура); зовнішні (входи, виходи);
- межі системи;
- параметри зовнішнього середовища;
- параметри внутрішнього середовища.

Слід зазначити, що основна проблема побудови моделей складних систем полягає в знаходженні компромісу між простотою опису системи та ступенем її деталізації.

Один зі шляхів рішення цієї проблеми – опис системи сімейством моделей, кожна з яких описує поведінку системи з погляду відповідного рівня абстракції. Для кожного рівня абстракції існують характерні риси, закони та принципи, за допомогою яких описується поведінка системи на цьому рівні. Таке подання називають стратифікованим, а рівні абстракції – стратами. У теорії багаторівневих ієрархічних систем заведено зазначати шість рівнів абстракції (6 страт):

- страта 6 – філософські або теоретико-пізнавальні описи задуму системи;
- страта 5 – подання системи мовою обраної наукової теорії;
- страта 4 – проектне подання системи;

- страта 3 – конструкція системи (конструкторська документація);
- страта 2 – технологія (технологічна документація);
- страта 1 – матеріальне втілення системи.

У процесі дослідження можуть додаватися нові страти, змінюватися підходи до їх визначення. На кожній страті може використатися свій опис, своя модель, але система повинна залишатися однаковою, тобто загальний її задум і контури потрібно прагнути розкрити на кожному рівні абстракції таким чином, щоб як найкраще зрозуміти та реалізувати систему.


«Структурна схема» моделює систему, підсистеми або процеси, показуючи зв'язки між елементами. Вона використовується для аналізу структури і функціонування систем в різних сферах, таких як інженерія, економіка, комп'ютерні науки тощо.

### **3.10 Математичні аспекти побудови моделей складних систем**

Процес побудови моделей складних систем на практиці стикається з більшими труднощами. Найбільші труднощі закладені в самому понятті «складна система». До характерних рис складних систем відносяться:

- велика кількість взаємозалежних елементів і підсистем;
- складність функцій системи, спрямованих на досягнення цілей системи;
- багатомірність системи, обумовлена наявністю великої кількості зав'язків між підсистемами;
- взаємодія з зовнішнім середовищем і функціонування в умовах впливу випадкових факторів;
- різноманіття фізичної природи підсистем та елементів;
- наявність безлічі показників, що характеризують різні властивості і якості системи;
- слабка структурованість властивостей системи, її підсистем;
- наявність розгалуженої мережі інформаційних потоків та ієрархічність структури керування системою;
- неможливість широкого застосування класичних методів при аналізі системи через низький рівень формалізації процесів, що протікають у системі, а також складу та структури системи;
- великий ступінь невизначеності в інформаційних характеристиках стану системи.

Наведені особливості не дозволяють підійти до побудови моделі складної системи з позицій класичного математичного моделювання. Опис системи, особливо на верхньому рівні абстракції, має, як правило,



вербальний (словесний) характер, а алгоритми мають логіко-процедурну структуру. Однак на більш низькому рівні аналізу системи моделі підсистем, агрегатів та елементів, а також процесів, що їх об'єднують, усе в більшій мірі піддаються формалізації та математизації в загальноприйнятому змісті.

Важливу роль у побудові моделей складних систем грають *імітаційні моделі*, які, використовуючи великі можливості сучасної обчислювальної техніки, дозволяють об'єднати логіко-процедурні та аналітичні моделі, що описують окремі компоненти системи.

Процес побудови *математичної моделі* об'єкта (системи) можна подати у вигляді послідовності етапів, показаних на рисунку 3.3.

Питання про те, модель якого об'єкта збирається створювати дослідник, тільки на перший погляд здається простим. У міру ускладнення створюваних систем і більш глибокого проникнення інтересів дослідника в середовище його перебування структуризація об'єкта дослідження, тобто зазначення його на певному фоновому просторі, стає усе більш складним завданням. Збільшується невизначеність у визначенні меж об'єкта, його цілей і функцій, його складу і структури, зв'язків з зовнішнім середовищем.

Для того, щоб виділити об'єкт дослідження, треба, по суті, побудувати для нього модель «Чорний ящик». Таким чином, побудова математичної моделі починається з загальносистемного моделювання об'єкта.

Після того, як межі об'єкта визначені, тобто об'єкт відокремлений з навколишнього середовища, переходять до другого етапу побудови моделі – збору вихідної (попередньої) інформації про об'єкт. Тут може бути зазначено два під етапу. Спочатку дослідник звертає увагу на ту інформацію про систему, що лежить на поверхні, що відразу ж впадає в око. На першому етапі дослідник повинен взяти під контроль всю можливо доступну інформацію про систему.

Другий під етап збору вихідної інформації про систему настає після того, як дослідник досить добре уявив собі об'єкт, що досліджується, його призначення, функції та властивості, склад та структуру. Тут уже потрібні спеціальні організаційні зусилля з пошуку або виявлення цікавої інформації (організація спеціальних спостережень, архівні пошуки, опитування людей тощо).

На цьому під етапі дослідник повинен уявити собі ті похідні показники якості системи, з якими йому доведеться працювати, і відповідно до цього збирати додаткову інформацію про об'єкт. На цьому ж етапі вирішується питання первинної обробки інформації про систему, що необхідна для правильного та раціонального зберігання даних, обміну даними між користувачами та своєчасним їх поповненням і добуванням.

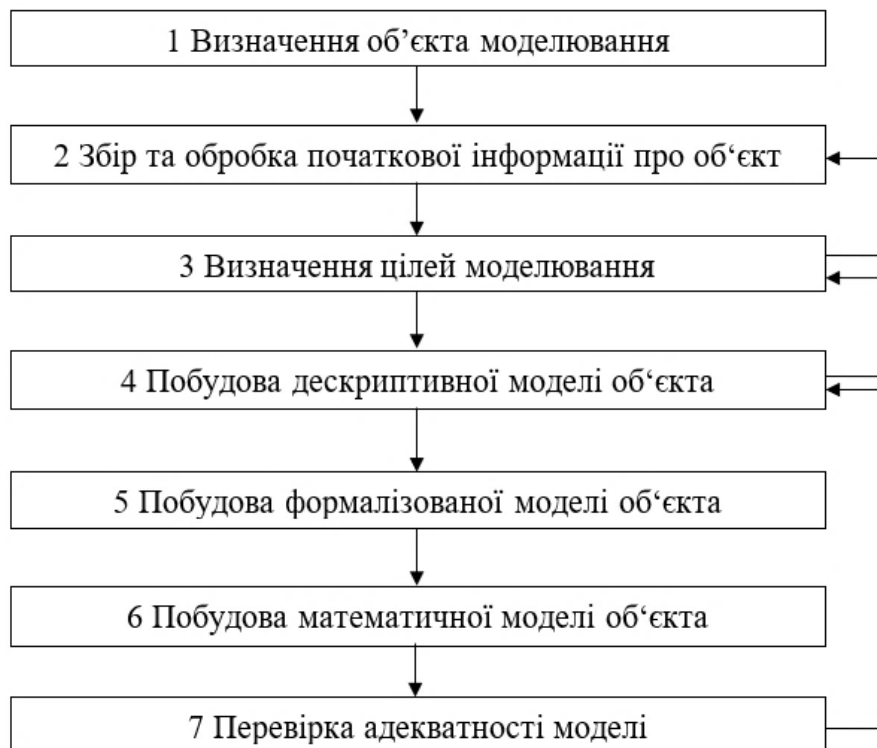



Рисунок 3.3 – Етапи побудови математичної моделі

Збір інформації про об'єкт істотно залежить від того, що з цими даними збираються робити, навіщо вони потрібні. Щоб відповісти на ці питання, дослідник повинен по можливості досить чітко уявляти цілі побудови моделі. Цілі моделювання впливають і на вибір типу моделі або математичного апарата, за допомогою якого формується модель, а також на обсяг, номенклатуру і якість даних. Цілі моделювання в значній мірі визначаються цілями системи, яку моделюють, а вони, у свою чергу, визначаються проблемами, які необхідно вирішити. Після визначення та уточнення цілей моделювання може виникнути необхідність у додатковій інформації про об'єкт моделювання, в уточненні або корекції вихідної інформації.

*Дескриптивна (описова) модель* – перша ітерація словесного опису самого об'єкта, його підсистем та елементів, процесів, що протікають у ньому, а також деякий погляд на закономірності, що характеризують процеси і явища, які відбуваються у системі.

Для побудови дескриптивної моделі необхідно ретельне вивчення об'єкта, спостереження за ним і зазначення сукупності властивостей об'єкта, які надалі можна параметризувати. У випадку побудови моделі об'єкта, що проектується, дескриптивна модель складається на основі



досвіду або спостереження за аналогічними реально існуючими об'єктами.

Дескриптивна модель, як правило, складається фахівцями в конкретній сфері без активної участі математиків (присутність системних аналітиків бажана, особливо якщо система складна). Однак вона повинна обов'язково містити перелік залежностей, що підлягають оцінці, а також перелік факторів, які мають бути враховані при побудові моделі. До неї включаються також вихідні дані у вигляді таблиць, графіків, початкових умов, нормативних значень показників тощо.

*Формалізована модель* – це проміжний етап між дескриптивною та математичною моделлю. Вона реалізується у тому випадку, якщо неможливий безпосередній перехід від дескриптивної моделі до математичної. Формалізована модель може залишатися словесною (вербальною), але вимоги до строгості опису моделі мають бути високими. Це означає, що мають бути чітко визначені всі поняття та терміни. Якщо на поняття та терміни відсутні стандарти, керівні документи або словникові визначення, то вони мають бути визначені та погоджені з замовниками та з розроблювачами. На цьому ж етапі бажано мати погоджені функціональні та інформаційні моделі об'єкта (системи), а також формалізовану модель його життєвого циклу.

При побудові формалізованої моделі уточнюються показники та параметри об'єкта, визначаються шкали їх виміру та виробляється узгодження шкал. За характеристики властивостей об'єкта бажано вибирати такі, які забезпечують зручність користування та доступність одержання, а також дозволяють у можливо більшому ступені спростити модель (природно, без втрати якості моделі).


Подальше перетворення формалізованої моделі в математичну модель здійснюється практично без припливу додаткової інформації. Для здійснення цього перетворення необхідно:

- записати в математичній формі всі співвідношення, які не були записані на попередньому етапі;
- по можливості додати аналітичну форму всім відомостям, що містяться у формалізованій моделі, зокрема логічним умовам, розподілам випадкових величин та іншим числовим даним.

*Адекватністю* називають властивість моделі, що полягає в її здатності відтворювати з необхідною повнотою ті властивості об'єкта, які істотні для цілей даного дослідження.

Вимога адекватності моделі та об'єкта – це необхідна умова для переходу від дослідження об'єкта до дослідження моделі та подальшого перенесення результатів з моделі на об'єкт дослідження.

Виходячи з того, що будь-яка модель завжди є спрощеною копією оригіналу, не можна говорити про абсолютну адекватність моделі. Оцінка



ступеня подібності може опиратися тільки на оцінку відмінності від оригіналу, що на практиці викликає великі труднощі, тому що неможливо використати для порівняння об'єкт у всій його повноті через невірогідність інформації про об'єкт у цілому або його частини.

Тобто, моделювання є ключовим методом дослідження складних систем, що дозволяє аналізувати їхню поведінку та прогнозувати результати функціонування. Воно ґрунтується на принципах гомоморфного та ізоморфного відображення, що забезпечує створення моделей, адекватних реальним об'єктам.

Моделі класифікуються за різними ознаками, зокрема за метою дослідження, способом відтворення та рівнем абстракції. Використання математичних, імітаційних і знакових моделей сприяє більш точному аналізу систем та їх оптимізації.

Значущість моделювання в комп'ютерних науках, інженерії та інших галузях зумовлена можливістю тестування й удосконалення систем без значних фінансових витрат і ризиків. Таким чином, моделювання є потужним інструментом аналізу, прогнозування та прийняття рішень у сучасному світі

### **3.11 Висновок до теми**

Моделювання є основним засобом дослідження складних систем, що забезпечує можливість аналізу, прогнозування та оптимізації їх функціонування. Створення моделі передбачає відбір найбільш значущих характеристик об'єкта, що дозволяє спростити дослідження без втрати сутності явища.

У системному аналізі моделі слугують інструментом перевірки управлінських, технічних та соціально-економічних рішень, допомагаючи знаходити ефективні шляхи досягнення поставлених цілей.

Отже, володіння методами моделювання є необхідною складовою професійної підготовки фахівця, здатного приймати обґрунтовані рішення в умовах складності та невизначеності.



## ТЕМА 4. ДЕКОМПОЗИЦІЯ СИСТЕМ ТА МЕТОДИ ЇХ ОЦІНЮВАННЯ

У процесі системного аналізу однією з ключових задач є дослідження структури складних систем, що реалізується за допомогою методу декомпозиції. Цей метод дозволяє поділити систему на окремі підсистеми або елементи, кожен з яких має власні функції, взаємозв'язки та характеристики. Такий підхід дає можливість зменшити складність аналізу, підвищити точність оцінки та полегшити процес проектування технічних і інформаційних систем.


У межах теми розглянемо принципи блочно-ієрархічного підходу, методи якісного та кількісного оцінювання елементів системи, а також роль комп'ютерних технологій у процесі декомпозиції. Особливу увагу приділимо ітеративному підходу до аналізу та практичним прикладам застосування декомпозиції в інженерних, економічних та інформаційних системах.

### 4.1 Декомпозиція систем. Поняття проектування

Проектування технічних об'єктів є складним процесом, що включає перетворення ідей та вимог до майбутнього виробу в формалізований опис, який служить основою для його виробництва. У сучасному світі, де технології розвиваються швидкими темпами, проектування стає багатограним процесом, який враховує не лише технічні вимоги, але й економічні, екологічні та ергономічні аспекти. Проектування об'єктів, особливо складних систем, вимагає дотримання певних принципів та підходів, таких як декомпозиція, ієрархічність, ітеративність та автоматизація процесів. Це дозволяє забезпечити ефективність, якість та відповідність об'єкта вимогам сучасного ринку.

Особливістю проектування є застосування системного аналізу, що дає змогу структурувати інформацію, виділяти ключові елементи та їх взаємодії, а також оцінювати різні варіанти рішень. Зокрема, метод декомпозиції допомагає розділити систему на складові частини для докладного вивчення та оптимізації кожного елемента. Автоматизовані системи проектування (CAD/CAM) дають змогу використовувати потужні інструменти для розробки, моделювання і випробування моделей, що значно підвищує точність і знижує витрати на етапі розробки.

Розглянемо основні етапи проектування технічних об'єктів, принципи системного підходу, метод декомпозиції та способи оцінювання технічних рішень.



*Проектування технічних об'єктів* – це процес, що полягає в перетворенні вихідного опису технічного об'єкта в остаточний формалізований опис на основі виконання комплексу робіт дослідницького, розрахункового та конструкторського характеру.

Проектування технічного об'єкта починається з розробки завдання на проектування, що відбиває потреби суспільства в одержанні деякого технічного виробу. Завдання представляється у вигляді тих або інших документів та є вихідним (первинним) описом об'єкта. Технічне завдання, як правило, містить загальні вимоги до об'єкта, що розроблюється, цілі та завдання розробки, техніко-економічне обґрунтування проекту, календарний план та основні етапи розробки, очікувані результати роботи.

Результатом проектування, як правило, є повний комплект документації, що містить достатні відомості для виготовлення об'єкта в заданих умовах. Документація являє собою остаточний опис об'єкта.

Перетворення вихідного опису в остаточне породжує проміжні описи, які є предметом розгляду з ціллю визначення етапів та напрямків подальшої роботи. Такі описи називаються *проектними рішеннями*.


Проектування, при якому всі або частина проектних рішень одержують шляхом взаємодії людини та ЕОМ, називають *автоматизованим*.

При проектуванні складних об'єктів та систем використовують принципи системного аналізу, основними з яких є *декомпозиція та ієрархічність опису, багатетапність та ітераційність проектування, типізація та уніфікація проектних рішень і засобів проектування*.

*Декомпозиція в проектуванні* це розбиття системи на окремі компоненти, кожен з яких виконує певну функцію. Наприклад, автомобіль може бути розділений на такі складові, як двигун, ходова частина, кузов, електронна система керування тощо. Це дозволяє проектувальникам зосередитися на кожному елементі окремо, забезпечуючи високу деталізацію.

*Ітеративність процесу* розглядається в тому, що проектування часто включає кілька циклів розробки, де кожна ітерація уточнює деталі й усуває недоліки попередніх етапів. Наприклад, проектування літака може початися з концептуальної моделі, потім перейти до уточненого проекту, а далі – до серії тестових моделей, де вносяться коригування на основі результатів випробувань.

Використання комп'ютерного забезпечення для створення та перевірки проектів, що дозволяє значно прискорити процес розробки, це *автоматизоване проектування (CAD/CAM системи)*. Наприклад, CAD (Computer-Aided Design) використовують для проектування деталей і



створення 3D-моделей, а САМ (Computer-Aided Manufacturing) – для управління процесом виготовлення на виробництві.


Проектування складається з декількох етапів.

На першому етапі - *аналіз потреб і початкове планування* - відбувається дослідження основної мети, для якої розробляється об'єкт, та визначення його ключових функцій. Здійснюється збір вимог від усіх зацікавлених сторін, включаючи клієнтів, користувачів і технічних фахівців. Задача проєктувальника – виявити, які проблеми повинен вирішувати об'єкт, які обмеження існують (наприклад, бюджет, розміри, ресурси), а також які стандарти і норми мають бути дотримані. Крім того, розглядаються можливі ризики, створюється попередній план реалізації та прогнозується термін виконання проєкту.

Другий етап - *побудова концептуальної моделі* - включає розробку початкового концептуального уявлення про об'єкт у вигляді ескізу або спрощеної моделі. Концептуальна модель описує основні компоненти об'єкта та їх функції, що дає загальне уявлення про майбутній виріб. На цьому етапі проводиться аналіз можливих архітектур і структур для вибору оптимальної. Для складних об'єктів концептуальна модель може включати декілька варіантів реалізації, які аналізуються з точки зору ефективності, надійності та витрат. Основна мета – закласти базові ідеї, які надалі будуть уточнюватися.

На третьому етапі - *розробка технічних рішень* - концептуальна модель деталізується і перетворюється на повноцінну технічну модель. Всі компоненти проєктуються з урахуванням точних розмірів, матеріалів і необхідних характеристик. Створюються специфікації для кожної частини об'єкта, що включають технічні параметри, розрахунки навантажень, схеми електричних або гідравлічних систем, вибір матеріалів та обґрунтування вибраних рішень. На цьому етапі також визначаються всі взаємозв'язки між компонентами та параметри, які забезпечують оптимальну роботу об'єкта. Часто використовується комп'ютерне моделювання для перевірки проєкту на міцність, надійність і відповідність вимогам безпеки.

Кінцевий етап проектування - *підготовка технічної документації* - включає оформлення всіх матеріалів у вигляді комплексу технічної документації. Це можуть бути креслення, схеми, розрахунки, специфікації матеріалів, інструкції зі складання, експлуатації та обслуговування об'єкта. Технічна документація є обов'язковою для запуску об'єкта у виробництво або експлуатацію, і вона включає всю необхідну інформацію для виготовлення, тестування, контролю якості та подальшої підтримки. Ця документація забезпечує повну відповідність виробу проєкту, а також його стандартизацію і уніфікацію.



Кожен з цих етапів є критично важливим, оскільки дозволяє послідовно перетворити ідею на завершену інженерну розробку, готову до виготовлення і використання.

Наприклад, проектування автомобіля. Починається з визначення технічних вимог (призначення автомобіля, тип двигуна, економічність, рівень безпеки тощо). Після цього проводиться розробка загальної концепції – наприклад, визначення розмірів, ваги, компоновання, а також естетичних та ергономічних аспектів. На наступному етапі створюються детальні 3D-моделі в системах CAD, які включають деталі, такі як двигун, трансмісія, підвіска та кузов. Після затвердження моделей готується технічна документація для виробництва, яка охоплює креслення, специфікації та вимоги до матеріалів.

Якщо розглянути проектування комп'ютерної системи (серверного центру). На етапі проектування технічного завдання визначають, скільки користувачів буде обслуговувати система, які обсяги даних оброблятимуться, очікуваний рівень безпеки та енергоспоживання. Концептуальна модель включає розподіл компонентів на сервери, системи зберігання даних, мережеві компоненти. Декомпозиція дозволяє відокремити апаратну частину (сервери, сховища) від програмної (системне забезпечення, служби захисту). Кінцевий результат включає специфікацію необхідного обладнання, креслення розміщення, плани охолодження та резервного живлення.

## 4.2 Блочно-ієрархічний підхід до аналізу та опису систем

Опис технічного об'єкта повинен бути погоджений з можливістю сприйняття людиною та оперування описами в процесі їх перетворення за допомогою наявних засобів проектування.

Виконати загальний опис та перетворити інформацію таким чином, щоб одержати якісне рішення для об'єкта без виявлення його структури, дуже складно. Елемент об'єкта (системи) удосконалити завжди легше, ніж систему в цілому внаслідок його спеціалізації для виконання конкретної функції. Структурування описів об'єкта приводить до блочно-ієрархічної моделі подання даних, а також виділенню **аспектів описів**. Таке структурування дозволяє розпаралелити роботу при проектуванні, сприяє підвищенню продуктивності праці за рахунок спеціалізації.

В основі блочно-ієрархічного підходу лежить виявлення ієрархічних рівнів (рівнів абстракції) у поданнях про об'єкт. На кожному *рівні абстракції* використовуються свої поняття про систему та її елементи. На верхньому рівні (рівень 0) розташований складний об'єкт проектування S

(рис. 4.1), що розглядається як система з  $n$  взаємозалежних та взаємодіючих елементів  $S_i$ ,  $i=1\dots n$  (рівень 1). Елементи  $S_i$  у свою чергу розглядаються як такі, що складаються з  $m$  взаємозалежних та взаємодіючих елементів  $S_{ij}$  на рівні 2 ( $j=1\dots m$ ).

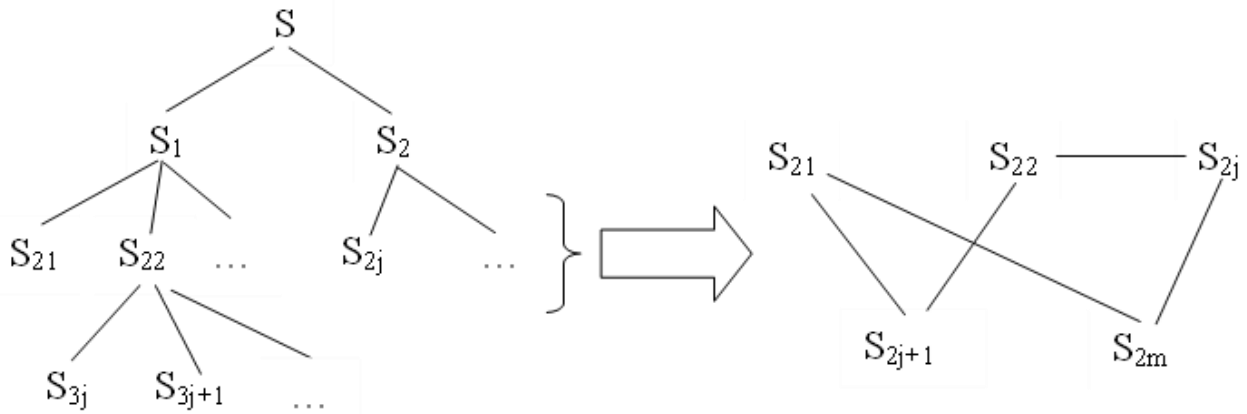


Рисунок 4.1 – Блочно-ієрархічний підхід до розгляду системи

Така розбивка триває доти, поки вона не стає достатньою у рамках задачі, що розглядається. Елементи, які не підлягають розподілу, називають *базовими*.

В основі блочно-ієрархічного підходу лежать принципи декомпозиції та ієрархичності.

*Принцип декомпозиції* полягає в розбивці подань кожного рівня на ряд складових частин (блоків) для роздільного аналізу та проектування.

*Принцип ієрархичності* полягає в структуруванні представлення про об'єкти проектування за ступенем деталізації опису.

Таким чином, при проведенні декомпозиції системи будується дерево, на кожному рівні якого система розглядається з різним ступенем деталізації. Додатково до дерева можуть бути побудовані графи для кожного з рівнів декомпозиції, які відображають зв'язки (механічні, логічні, потоки енергії, інформаційні потоки тощо) між елементами системи на відповідному рівні абстракції. Слід зазначити, що необхідно розумно визначати ступінь декомпозиції системи, щоб зайва деталізація не заважала розглядати задачі, пов'язані з цією системою.

Процес зворотної декомпозиції називається *агрегуванням*. Він пов'язаний з компонуванням системи з блоків, що її складають. Дослідження психологів показали, що людина може комфортно маніпулювати 5-7 блоками системи. Якщо кількість елементів системи більше, тоді ефективність роботи знижується.

При виділенні рівнів абстракції в машинобудуванні звичайно розрізняють:

- *комплекти* – потокові лінії тощо;
- *агрегати (комплекси)* – верстати, преси;
- *складальні одиниці (вузли)* – вузол «вал з шестірнею та підшипниками»;
- *базові елементи* – деталі, вали;
- *геометричні елементи*, що визначають форму деталей – поверхні, лінії, точки.

У металургії рівні абстракції можна визначити наступним чином:

- *комплекси* - великі виробничі лінії для безперервного лиття, сталеплавильні установки, доменні печі, які працюють як єдине ціле для забезпечення безперервного виробничого процесу;
- *агрегати* - основні великі установки, такі як конвертери, печі для виплавки сталі, прокатні стани, печі для нагріву або термічної обробки металу;
- *складальні одиниці (вузли)* - вузли всередині агрегатів, наприклад, ливарні форми для лиття, ролики прокатних станів, повітродувки або паливні форсунки;
- *базові елементи* - окремі деталі, які складають вузли, наприклад, вали, шестерні, електроди, кріплення, прокатні валки;
- *геометричні елементи* - елементи, що формують деталі, такі як поверхні валів, канавки, отвори, фаски на краях, криві, які визначають форму і функцію металевих деталей.

Ця ієрархія дозволяє ефективно організувати проектування та управління різними рівнями металургійного виробництва, від великих комплексів до найдрібніших елементів конструкції.

При декомпозиції технічних систем виділяють наступні поняття:

- *вузол технічного об'єкта* – множина конструктивно зв'язаних деталей, що виконують одну функцію по забезпеченню функціонування інших елементів;
- *великі вузли* – елементи, які можуть бути розбиті на більш дрібні підвузли для виконання підлеглих функцій (підфункцій) на наступному рівні абстракції;
- *деталь технічного об'єкта* – елемент конструкції з однорідного матеріалу, що виконується без використання складальних операцій; деталь виконує хоча б одну функцію в системі;
- *неподільний елемент* – частина деталі або сама деталь, що виконує мінімальну кількість функцій по забезпеченню роботи інших деталей; при поділі неподільного елемента з'являються частини, що не мають самостійного значення або мають однакові функції. Ось зображення, яке ілюструє процес декомпозиції технічної системи, розподіленої на різні рівні абстракції: від великих вузлів до базових елементів.



### 4.3 Системний аналіз об'єктів на початкових етапах життєвого циклу

Існує кілька видів описів об'єктів, що відрізняються по рівнях осмислення їх функціонування та аспектам опису.

*Параметричний опис* – найпростіша форма опису властивостей, ознак, відносин об'єктів з використанням емпіричних спостережень, заснованих на органах почуттів.


Параметричний опис містить у собі виділення ознак об'єкта або системи, властивостей, характеристик. На першому етапі об'єкт вивчають за допомогою органів почуттів або з використанням будь-якої іншої інформації, наприклад з різних літературних джерел. Виконують опис властивостей і відносин даного об'єкта з іншими та з зовнішнім середовищем. Бажана чисельна характеристика виділених властивостей системи, визначення розмірності цих характеристик, а також взаємозв'язку між ними.

Наприклад, при дослідженні будівельного матеріалу (бетону) проводиться параметричний опис його властивостей, таких як міцність на стиск, щільність, колір, текстура, тепло- і звукоізоляційні характеристики. Ці властивості вимірюються або спостерігаються емпірично і можуть бути чисельно виражені: наприклад, міцність на стиск - 25 МПа, щільність - 2400 кг/м<sup>3</sup>.

*Морфологічний опис* – перехід до визначення состава елементів, що входять у систему, її будови, визначенню взаємозв'язків параметрів, виявлених у процесі попереднього опису. Декомпозиція системи проводиться до рівня її елементів. *Елемент* – мінімальна неподільна частина (компонент) системи, яка отримана її поділом в умовах даної задачі. Функції елементів визначаються місцем і порядком їх включення в систему.

Наприклад, при аналізі комп'ютера його морфологічний опис включатиме визначення його компонентів - процесор, материнська плата, оперативна пам'ять, жорсткий диск, блок живлення тощо. Ці компоненти взаємопов'язані через фізичне підключення (наприклад, жорсткий диск підключений до материнської плати через SATA інтерфейс), що забезпечує їхню спільну роботу в рамках системи.

*Функціональний опис* – перехід до визначення функціональних залежностей між параметрами (функціонально-параметричний опис) або між елементами системи (функціонально-морфологічний опис). Під *функцією* розуміють взаємозв'язок, що визначає призначення та порядок включення в систему її частин.



Наприклад, для функціонального опису автомобіля можна визначити взаємодії між його підсистемами. Функція двигуна - виробляти крутний момент для руху автомобіля, а гальмівної системи - знижувати його швидкість. Кожна з підсистем автомобіля виконує конкретну функцію в межах загальної системи, і їхні зв'язки описуються для забезпечення цілісної роботи.

*Опис поведінки (життя) об'єкта* являє собою найбільш повний вид опису. Це виявлення загальної (цілісної) картини життя об'єкта в умовах, що визначають зміну режимів роботи системи, причини та правила зміни станів системи в процесі цілеспрямованої діяльності.

Наприклад, для опису поведінки кліматичної системи регіону можна побудувати модель її життєвого циклу, як вона реагує на сезонні зміни: взимку температура знижується, що призводить до замерзання водойм; влітку зростає, викликаючи танення льоду та випаровування води. Така модель включає правила, що пояснюють зміну станів системи залежно від зовнішніх умов.

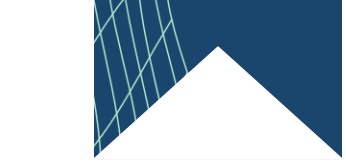
Припустимо, ми описуємо систему *домашнього кондиціонера*. Ось як можуть виглядати всі чотири типи описів для цієї системи.

*У параметричному описі* виділяють основні числові характеристики кондиціонера: потужність охолодження: 2,5 кВт, рівень шуму: 35 дБ, споживана потужність: 0,8 кВт, енергоефективність: клас A++, температурний діапазон роботи: від -10 до +43 °С. Ці параметри допомагають користувачам і технічним спеціалістам оцінити продуктивність кондиціонера та його придатність для використання в певних умовах.

*Морфологічний опис* описує конструктивні елементи кондиціонера: внутрішній блок (вентилятор, повітряний фільтр, випарник), зовнішній блок (конденсатор, компресор, вентилятор), трубки для фреону, що з'єднують внутрішній і зовнішній блоки, датчики температури для контролю навколишнього середовища. Цей опис дозволяє зрозуміти, як компоненти взаємодіють між собою, щоб виконувати свої функції в рамках системи охолодження.

*Функціональний опис* визначає ролі та функції кожного компонента кондиціонера: компресор стискає фреон, перетворюючи його на рідину високого тиску, випарник охолоджує повітря в приміщенні за рахунок розширення фреону, вентилятор всмоктує повітря з кімнати, пропускає його через фільтр і випарник, а потім повертає охоложене повітря назад у приміщення. Цей опис пояснює, як кондиціонер виконує свою основну функцію - охолоджує повітря в приміщенні, використовуючи різні компоненти системи.

*У поведінковому описі* досліджуються зміни режимів роботи кондиціонера залежно від умов: у режимі охолодження кондиціонер



знижує температуру повітря, коли датчики реєструють підвищення температури, у режимі осушення кондиціонер забирає вологу з повітря, якщо рівень вологості занадто високий, кондиціонер автоматично вимикається при досягненні заданої температури або включається знову, коли температура змінюється. Цей опис дозволяє зрозуміти, як кондиціонер адаптується до змін зовнішніх умов, щоб забезпечувати комфорт користувача в різних ситуаціях.

Ці чотири види опису дають всебічне уявлення про кондиціонер: від його основних параметрів і структури до того, як він функціонує і поводить себе в різних умовах.

Основний принцип системного аналізу – *концепція цілісності*, що припускає наявність у системи системного ефекту, тобто наявність таких властивостей, які не можуть бути властиві її частинам. Причиною системного ефекту є наявність зв'язків між елементами.

Можливі різні варіанти декомпозиції об'єктів. Як графічне зображення аспектів при декомпозиції використовують: функціональні, структурні, кінематичні схеми та інші документи.

Декомпозиція може проводитися з різних точок зору на систему (аспектів описів):

- *функціональний аспект* пов'язаний з відображенням основних принципів функціонування системи – розглядають характер процесів, що протікають; як зображення використовують схеми, потокові діаграми, дерева або графи;

- *конструктивний аспект* пов'язаний з реалізацією функціонального проектування, з визначенням геометричних форм елементів системи і їх розташуванням у просторі – як зображення використовують дерева або графи;

- *технологічний аспект* відноситься до реалізації результатів конструкторського проектування, пов'язаний з визначенням методів та засобів для підготовки та виготовлення об'єктів – як графічне відображення використовують дерева, графи, технологічні карти.

Можуть використовуватися і інші аспекти, важливі для роботи системи. Наприклад, функціональний аспект можна розділити за фізичними основами функціонування системи на електричний, механічний та інші. Завжди бажано виділяти принципи поділу системи, а після поділу виділяти можливі варіанти виконання елементів системи з наступним графічним представленням результатів декомпозиції.

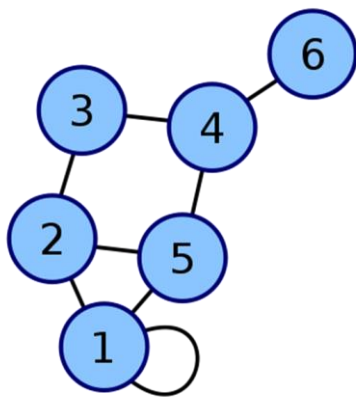
#### 4.4 Синтез проектних рішень. Представлення інформації про об'єкт з використанням І-дерев

Як графічне представлення опису системи можуть використовуватися графи (дерева). Опис у вигляді І-дерева зручно застосовувати для конкретного об'єкта. *І-дерево* являє собою множину вершин та ребер, що їх поєднують. Вершини розділені на *яруси*, кожний з яких відноситься до одного з *ієрархічних рівнів*. Таким чином, розбивка об'єкта перебуває в рамках блочно-ієрархічного підходу до структурного опису об'єктів. *Вершини* відображають складові частини об'єкта, що проектується. *Ребра* відбивають усілякі зв'язки між вершинами (не обов'язково механічні). При створенні програмних продуктів вказують потоки даних між блоками, модулями.

Вершини (елементи) нижнього ярусу (ієрархічного рівня) у рамках прийнятого представлення складної системи називаються *базовими елементами* або *листами*.

Для автоматизації обробки інформації, представленої у вигляді графів і дерев, їх можна описати у вигляді *матриці суміжності* та *матриці інцидентності*.

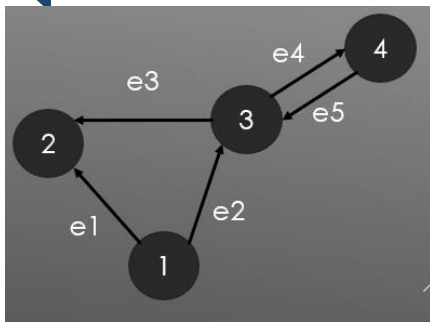
Матриця суміжності для графа  $G(n)$  (рис. 4.2) має вигляд  $M = [m_{ij}]$ , ( $i, j = 1 \dots n$ ), де  $n$  - число вузлів графа. При наявності зв'язку між  $i$ -м та  $j$ -м вузлом значення  $m_{ij} = 1$ , інакше  $m_{ij} = 0$ .



$$G = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 4.2 – Приклад графа та матриці суміжності для нього

Матриця інцидентності має вигляд  $B = [b_{ij}]$  ( $i = 1 \dots n, j = 1 \dots k$ ), де  $n$  – число вузлів графа;  $k$  – кількість ребер графа (рис. 4.3). Якщо ребро  $j$  спрямоване з вузла  $i$ , то  $b_{ij} = +1$ . Якщо ребро  $j$  спрямоване до вузла  $i$ , то  $b_{ij} = -1$ . Якщо представлення структури системи виконано у вигляді неорієнтованого графа,  $b_{ij}$  в обох наведених вище випадках дорівнює 1.



$$G = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Рисунок 4.3 – Приклад графа та матриці інцидентності для нього

#### 4.5 Синтез технічних рішень на основі використання I-АБО-дерев

Метод призначений для рішення задач, пов'язаних з вибором найбільш раціональних технічних рішень. З математичної точки зору суть методу полягає в тому, що інформацію про прототипи або відомі технічні рішення певного призначення представляють і записують у вигляді I-АБО-дерев. Варіюючи на цьому дереві конструктивні елементи та ознаки, можна одержати як відомі, так і нові технічні рішення. Тому I-АБО-дерево – це графічне представлення багаторівневої ієрархічної морфологічної таблиці.

Метод синтезу технічних рішень на I-АБО-дереві має область найбільш ефективного застосування. При значному віддаленні від цієї області метод стає малоефективним. Найбільш ефективно застосування методу до класів технічних об'єктів, які задовольняють наступним умовам:

- клас технічних об'єктів повинен мати досить велике важко видиме для фахівців число різних технічних рішень, що продовжує рости, причому більшість технічних рішень не в сильному ступені відрізняються друг від друга за функціональними структурами та принципами дії та можуть бути об'єднані в загальне I-АБО-дерево;

- об'єкт повинен складатися з елементів, що мають невелике число взаємних функціональних і конструктивних зв'язків і не мають жорстких конструктивних обмежень, що виключають або обтяжують заміну елементів іншими альтернативними варіантами. До таких технічних об'єктів відносяться розосереджені в просторі потокові системи у вигляді технологічних ліній, вимірювальних або енергетичних систем і мереж та інше Використання методу утруднене для технічних об'єктів, що складаються з щільно скомпонованих, взаємно переплєтених та проникаючих друг у друга елементів.

При описі технічних рішень у вигляді ієрархічного дерева необхідно виконати наступне:

- вивчити технічний об'єкт або технічне рішення, розділити його на функціональні елементи, що представляють інтерес для задачі, що розглядається, та привласнити їм, по можливості, загальноприйняті найменування. Ці назви елементів зображують у вигляді вершин 1-го рівня ієрархічного дерева за назвою технічного об'єкта, що розглядається;
- для кожного функціонального елемента 1-го рівня визначити істотні (для задачі, що розглядається) конструктивні ознаки, які зображують у вигляді вершин 2-го рівня. Серед цих вершин можуть бути як ознаки, так і найменування функціональних елементів, на які має сенс розділити розглянутий елемент;
- якщо деякі елементи 2-го рівня недостатньо детально (повно) описують технічне рішення, то для них варто повторно виконати процедури попереднього етапу.

Звернемо увага на те, що дерево опису окремого технічного рішення має тільки І-вершини, позначені зафарбованими крапками.

Як приклад послідовності побудови І-АБО-дерева, що включають вузли І та АБО, розглянемо варіанти конструкцій технічного об'єкта «Чайник».

І-вершини показують, що конкретний варіант технічного об'єкта «чайник» складається (на 1-м рівні декомпозиції) з корпусу, кришки та ручки, які є складальними одиницями системи, а вершини 2-го рівня пов'язані з перерахуванням деталей, що їх складають. Такі дерева, що описують окремі технічні рішення, і називають І-деревами.

Приклад І-дерева для розглянутого технічного рішення представлено на рисунку 4.4.

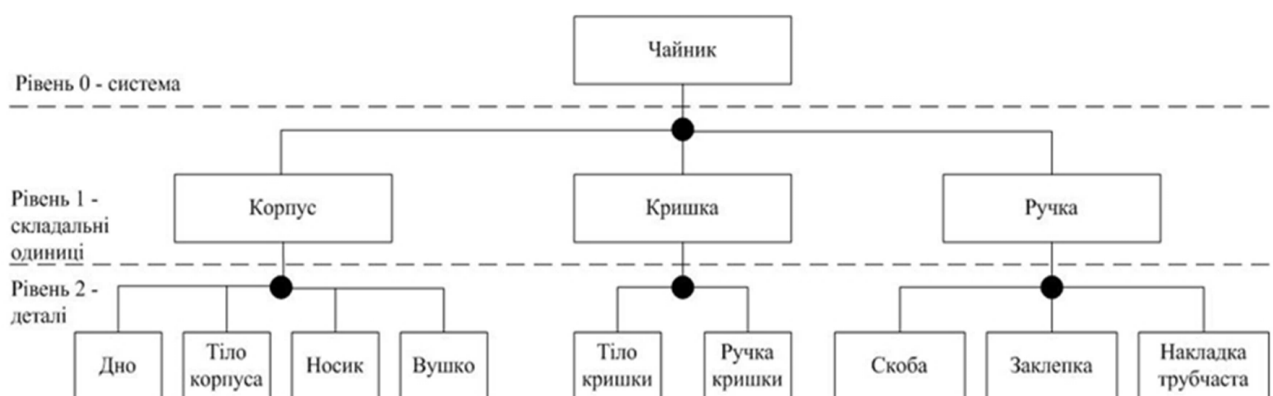


Рисунок 4.4 – І-дерево для системи «Чайник»

Для синтезу раціональних і нових технічних рішень необхідно представити для класу технічних об'єктів усі найцікавіші та істотно різні технічні рішення, у вигляді одного узагальненого дерева технічних рішень. Ця ціль досягається побудовою *I-АБО-дерева*, що, крім вершин I, що утворюють різні структури окремих технічних рішень, містить вершини АБО, що поєднують альтернативні елементи та ознаки, які характеризують індивідуальні особливості кожного технічного рішення (рисунок 4.5).

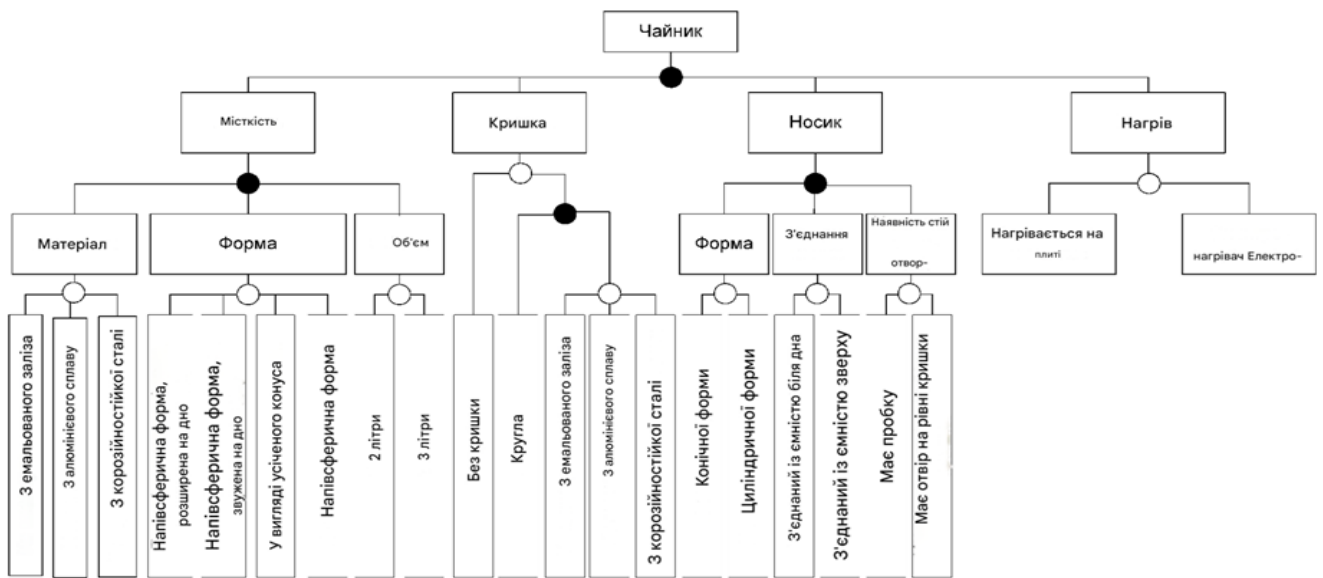



Рисунок 4.5 - *I-АБО-дерево* для системи «Чайник»

Побудова загального *I-АБО-дерева* виконується в наступному порядку:

1 Вся множина відібраних технічних рішень, для яких побудовані *I-дерева*, розбивають на кілька груп, кожна з яких складається з технічних рішень, найбільш близьких за будовою та функціям, що виконує система.

2 Для кожної групи беруть окремі елементи, що відносяться до 1-го ієрархічного рівня, і будують для них свої *I-АБО-дерева*, де *I-вершина* поєднує характерні елементи та ознаки 2-го рівня, а *АБО-вершини* – альтернативні елементи та ознаки.

3 *I-АБО-дерева*, побудовані для окремих груп технічних рішень, поєднують в одне загальне *I-АБО-дерево*. При цьому для спрощення загального дерева та найбільшого стиску інформації про весь клас технічних рішень рекомендується особливу увагу приділяти єдиній термінології, тобто конструктивні елементи та ознаки, однакові за функціями та змістом, варто називати однаково.



Якщо *I-АБО-дерево* поєднує десятки та сотні варіантів технічних рішень, то потрібно створювати спеціальний термінологічний словник, що полегшує складання та розвиток *I-АБО-дерева* та підвищує якість опису технічних рішень. При створенні термінологічного словника доцільно використовувати рубрики показників класів винаходів, енциклопедій, технічні словники, стандарти на термінологію. Словник найкраще оформляти у вигляді таблиці, що містить чотири стовпці з наступними заголовками:

- опис функції елемента (вузла, деталі та інше);
- найменування елемента;
- можливі конструктивні ознаки елемента;
- ескіз технічного рішення елемента (ескізи значно полегшують перегляд та читання *I-АБО-дерева*, а також служать вихідною інформацією для складання ескізів синтезованих технічних рішень і розробки програм для автоматизованого виконання креслень).


Після складання загального *I-АБО-дерева* необхідно проконтролювати правильність побудови. При цьому варто керуватися тим, що *I-АБО-дерево* повинне забезпечувати зберігання інформації про всі відомі технічні рішення. При такому контролі беруть будь-яке технічне рішення у вигляді *I-дерева* та визначають, чи можна його одержати з загального *I-АБО-дерева* шляхом виключення АБО-вершин.

#### **4.6 Застосування комп'ютерних систем у процесі декомпозиції**

Застосування комп'ютерних систем у процесі декомпозиції стало ключовим фактором, що дозволяє значно підвищити точність, ефективність і швидкість виконання складних інженерних завдань. Зокрема, використання програмних інструментів для побудови дерев, графів та інших моделей надає можливість автоматизувати процеси декомпозиції та агрегації. Це досягається завдяки можливостям сучасних систем автоматизованого проектування (CAD) та інструментів системного аналізу, що інтегрують алгоритми для побудови ієрархічних структур і взаємозв'язків між елементами.

Розглянемо основні функції комп'ютерних систем у декомпозиції.

1 Автоматизована побудова ієрархічних дерев і графів. Для створення дерев використовують такі системи, як AutoCAD, SolidWorks, Siemens NX, які пропонують функціонал для побудови ієрархічних структур, що описують систему від загальних компонентів до найдрібніших деталей. Це дозволяє автоматично створювати зв'язки між елементами різних рівнів та зберігати ієрархічну модель об'єкта.



Спеціалізовані програми (наприклад, Microsoft Visio, IBM Rational Rhapsody) підтримують побудову графів, які ілюструють зв'язки та потоки між підсистемами, такими як інформаційні потоки, ланцюги передачі енергії або управлінські команди. Це важливо для складних систем, що вимагають багаторівневого аналізу.

2 Автоматизація декомпозиції та агрегації. Комп'ютерні програми здатні автоматично розділяти систему на рівні ієрархії (декомпозиція) або, навпаки, об'єднувати їх для цілісного аналізу (агрегація). Наприклад, в програмах типу MATLAB Simulink можна автоматично формувати моделі на основі функціональних блоків, що дозволяє імітувати роботу складних технічних систем та інтегрувати отримані результати в загальну модель.


3 Застосування алгоритмів для оптимізації декомпозиції. Багато сучасних систем включають алгоритми для оптимальної декомпозиції, які допомагають вибирати раціональні точки поділу для структурного аналізу системи. Це скорочує час проектування та знижує витрати на розробку, оскільки кожна компонента обробляється окремо, відповідно до заданих параметрів.

4 Моделювання та візуалізація. Комп'ютерні системи забезпечують тривимірну візуалізацію структури об'єкта, що дозволяє в реальному часі переглядати процес декомпозиції і перевіряти його на можливі помилки. Такі програми, як CATIA або Autodesk Revit, дозволяють не лише моделювати компоненти, але й візуально відслідковувати, як різні частини системи взаємодіють і впливають на загальну структуру.

5 Інтеграція з іншими системами та інструментами. Системи CAD та інші інструменти можуть бути інтегровані з програмами для інженерних розрахунків, аналізу даних або системами управління проектами, що дозволяє синхронізувати роботу різних підсистем. Це забезпечує безперервність у процесах декомпозиції та агрегації й дозволяє аналізувати результати на кожному етапі проектування.

5 Простота в реалізації ітераційного підходу. Комп'ютерні інструменти дозволяють легко вносити зміни, виправлення та доповнення в існуючі моделі, що сприяє ітеративному процесу проектування. Це особливо цінно в системах, де декомпозиція потребує багаторазових корекцій та уточнень для досягнення оптимальної структури.

Наприклад при розробка автомобільних систем, платформи, такі як Siemens PLM, дозволяють детально розробляти кожен модуль автомобіля, від двигуна до електроніки, створюючи багаторівневі ієрархічні моделі, а при проектування архітектурних споруд, програми на зразок Autodesk Revit надають можливість розподіляти будівлю на структурні, механічні, електричні та сантехнічні елементи, полегшуючи декомпозицію і згодом агрегацію моделі для аналізу надійності.



Таким чином, комп'ютерні системи для декомпозиції дозволяють прискорити розробку, підвищити точність і знизити витрати на проектування, а також зробити процес створення складних технічних систем зручнішим і наочнішим.


#### **4.7 Ітеративний підхід до декомпозиції**

*Ітеративний підхід* до декомпозиції є одним з найбільш ефективних методів для управління великими і складними проектами, де важливо поетапно уточнювати і деталізувати елементи системи. Він полягає в багаторазовому повторенні процесу поділу системи на компоненти, що дозволяє глибше зрозуміти структуру і функціональні можливості кожного елемента. Цей підхід дозволяє знаходити оптимальні рішення, поступово уточнюючи початковий задум і роблячи систему зрозумілішою на кожному рівні деталізації.

Основні принципи ітеративного підходу до декомпозиції це перш за все поступове уточнення вимог і характеристик. При першій ітерації створюється загальна структура проекту з описом основних блоків та їхньої взаємодії. На наступних ітераціях аналізуються та деталізуються окремі компоненти, що дозволяє проектній команді чіткіше розуміти їхні вимоги і забезпечити відповідність до загальних цілей системи. Наприклад, у проектуванні літаків ітеративний підхід допомагає уточнити вимоги до крил, двигунів та електронних систем, поступово від загальної концепції до найдрібніших деталей.

Також до основних принципів можна віднести виявлення і усунення проблем на ранніх етапах. Ітерації дозволяють команді зосередитися на вирішенні конкретних проблем, які можуть виникнути на кожному рівні деталізації. Це допомагає запобігти накопиченню помилок і недоліків на етапі кінцевого проектування, зменшуючи ризик великих змін або переробок. Наприклад, у розробці програмного забезпечення кожна ітерація дозволяє уточнювати архітектуру системи, виявляти вузькі місця і тестувати кожен модуль до інтеграції з іншими.

Адаптивність і гнучкість також відноситься до таких принципів. Ітеративний підхід дає можливість швидко реагувати на зміни в специфікаціях або вимогах. Це особливо важливо для складних проектів, де вимоги можуть змінюватися в процесі роботи. Команда може адаптуватися до нових умов або запитів, додаючи нові елементи чи змінюючи структуру без шкоди для основного процесу. Наприклад, у будівництві великих споруд ітерації дозволяють вносити корективи в



конструкції на кожному етапі, щоб врахувати екологічні або економічні зміни.

До основні принципи ітеративного підходу до декомпозиції можна ще віднести покращення точності і повноти моделі, тому що кожна нова ітерація дозволяє додати додаткову деталізацію, підвищуючи точність моделі системи та забезпечуючи її більш повний опис. Це забезпечує зручність для аналізу, оскільки розробники можуть врахувати всі деталі, перевіряючи сумісність і функціональність на кожному рівні.


А також можливість прогнозування і оцінки ризиків, тому що поступова деталізація надає можливість оцінити потенційні ризики і визначити проблемні області на ранніх етапах проектування. У кожній ітерації можна провести аналіз ризиків, що дозволяє усувати недоліки перед переходом до наступного рівня деталізації. Наприклад, у проектуванні автомобільних систем, ітерації допомагають прогнозувати навантаження на окремі елементи та оцінювати можливі збої.

Як приклади застосування ітеративного підходу в декомпозиції можна розглянути розробку інформаційних систем: У кожній ітерації уточнюються вимоги до функціональних модулів (наприклад, бази даних, інтерфейсу, аналітичних компонентів), що дозволяє адаптувати програму до змін у бізнес-процесах, або проектування космічних апаратів, де ітерації дозволяють перевіряти і оптимізувати критично важливі підсистеми, такі як системи навігації, управління та зв'язку, поступово деталізуючи їх структуру і функції.

Тобто, ітеративний підхід до декомпозиції є невід'ємною частиною сучасного проектування, особливо в умовах складності, масштабності та мінливості вимог до систем. Завдяки багаторазовій деталізації та періодичному аналізу, ітеративний процес дозволяє забезпечити високу якість розробки, оптимізувати ресурси та знижувати ризики, створюючи системи, які повністю відповідають вимогам і можуть бути адаптовані до змін.

#### **4.7 Висновки до теми**

Методи декомпозиції та оцінювання технічних систем є основою сучасного проектування, які забезпечують детальний аналіз об'єкта на кожному рівні його складності. Декомпозиція дозволяє розділити систему на структурні елементи, кожен з яких має свою чітко визначену функцію, що полегшує проектування та подальшу інтеграцію цих елементів в цілісний об'єкт.



Застосування різних типів описів - параметричного, морфологічного, функціонального та поведінкового - дає можливість повністю охопити всі аспекти функціонування системи. Такий підхід дозволяє не лише оптимізувати конструкцію об'єкта, а й покращити його продуктивність, підвищити надійність і відповідність до встановлених вимог. Впровадження блочно-ієрархічного підходу та автоматизованих систем проектування (CAD/CAM) також значно спрощує процес ітеративного доопрацювання рішень, дозволяючи оперативно реагувати на зміни та оптимізувати витрати.

Загалом, методи системного аналізу та декомпозиції сприяють створенню ефективних, функціональних і довговічних технічних систем, що відповідають сучасним вимогам якості та безпеки.



## ТЕМА 5 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ

Системи постійно вдосконалюються, щоб відповідати змінним вимогам, технологічному прогресу і суспільним потребам. Ключем до успішного розвитку технічних систем є розуміння та оптимізація їхньої якості та ефективності. Це дозволяє забезпечити відповідність систем сучасним стандартам, зменшити витрати на обслуговування та подовжити їх життєвий цикл.

*Показники якості й ефективності* визначають, наскільки довго система може залишатися актуальною і корисною, а також як її можна модернізувати чи адаптувати. Завдяки визначенню відповідних критеріїв розвитку можна впливати на кожен етап життєвого циклу системи - від проєктування до зняття з експлуатації.

*Показники розвитку технічних систем* це характеристики, що описують зміну властивостей системи протягом її існування.

Наприклад, вони можуть вказувати на покращення продуктивності, надійності або скорочення енергоспоживання. Сюди належать також показники інноваційності, які дозволяють оцінити, наскільки система відповідає останнім тенденціям у своїй галузі.

Існують певні закономірності розвитку технічних систем, які можна використовувати для прогнозування та вдосконалення їхніх показників.


Наприклад, закони еволюції систем визначають, як системи адаптуються до нових умов і технологій, тоді як критерії розвитку дозволяють оцінити, чи відповідає система вимогам до ефективності, продуктивності та безпеки.

*Якість функціонування системи* - це здатність системи виконувати свої основні функції відповідно до заданих характеристик. Вона включає стабільність роботи, точність, швидкодію, а також зручність у використанні. Вимоги до якості функціонування залежать від призначення системи та її користувачів.

*Показники якості* - це кількісні і якісні оцінки, що визначають ступінь відповідності функціональним вимогам.

*Показники ефективності*, в свою чергу, оцінюють здатність системи виконувати завдання з найменшими витратами ресурсів (енергії, часу, матеріалів). Разом ці показники дають змогу всебічно оцінити систему, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення про її подальший розвиток або оптимізацію.

Таким чином, показники якості та ефективності є основою для аналізу та оцінювання технічних систем на всіх етапах їхнього розвитку, від створення до модернізації, що дозволяє забезпечити оптимальне функціонування та відповідність сучасним вимогам.



У забезпеченні стабільної та продуктивної роботи технічних систем важливе значення має їхній розвиток та етапи життєвого циклу. Оскільки технічні системи постійно удосконалюються та змінюються відповідно до нових вимог і технологій, розуміння закономірностей їхнього розвитку дозволяє забезпечити довговічність і адаптивність цих систем.

Таким чином, розглянемо ключові аспекти розвитку систем, починаючи з показників, що характеризують кожен етап їхнього життєвого циклу, а саме - від створення до завершення експлуатації.

## **5.1 Розвиток систем. Показники розвитку систем. Життя технічних систем**

Рушійною силою розвитку технічних систем є *протиріччя*, що виникають між системою та зовнішнім середовищем або між частинами системи. Результатом розв'язання технічного протиріччя є створення нової технічної системи. Нова система органічно включає нове технічне рішення та елементи старого, а також інших рішень у новій якості (це справедливо навіть стосовно радикально нових систем).

Саме завдяки усуненню технічних чи фізичних протиріч відбувається розвиток у формі радикальних або поступових змін. Поглиблене розуміння цих протиріч може бути корисним для передбачення тенденцій розвитку.


У практиці для вирішення протиріч часто використовуються підходи такі як *методи теорії вирішення винахідницьких задач (ТРИЗ)*. Вони включають використання ресурсів системи, перенесення функцій, модифікацію середовища тощо. Це дозволяє знаходити несподівані рішення, які не завжди пов'язані з прямими технічними змінами.

Протиріччя бувають *адміністративні, технічні та фізичні*.

*Адміністративні протиріччя* формулюються у вигляді вказівок на необхідність рішення проблеми.

Наприклад, виробничий процес на підприємстві вимагає зниження витрат на сировину для збереження рентабельності, але водночас - підвищення якості продукції. Протиріччя - потреба у високій якості вимагає використання кращих матеріалів, але це збільшує витрати. Адміністративне рішення може передбачати вибір між якістю та економічністю, або ж пошук нових методів управління ресурсами, щоб знизити витрати без шкоди якості.

Або, потрібно збільшити швидкість виробничих операцій для задоволення зростаючого попиту, проте встановлені нормативи з безпеки вимагають обмежень на робочі швидкості для забезпечення здоров'я та



безпеки працівників. Протиріччя - адміністрація має знайти баланс між продуктивністю та безпекою, що може потребувати автоматизації частини процесів або інвестування в безпечніші технології.

*Технічні протиріччя* формулюються у вигляді пред'явлення до системи суперечливих технічних вимог. Для пошуку нових ідей формулюють так званій «ідеальний кінцевий результат», при реалізації якого необхідна дія відбувається сама собою, без витрат енергії та сил. Технічне протиріччя розкривається у фізичне протиріччя.

Наприклад, у процесі виготовлення деталей із металу необхідно підвищити міцність матеріалу (наприклад, для автомобільних деталей), що передбачає використання сплавів з більш високим вмістом важких металів. Водночас така зміна може знижувати оброблюваність матеріалу, збільшуючи знос інструментів та тривалість обробки. Протиріччя-збільшення міцності та оброблюваності є суперечливими вимогами. Для вирішення може бути застосовано комбінування різних технологій обробки або ж розробка інноваційних покриттів для інструментів, щоб знизити знос.

Або, наприклад потрібно зменшити масу літака для підвищення паливної ефективності, проте це вимагає зниження міцності та жорсткості його конструктивних елементів. Протиріччя- суперечливі вимоги до зменшення ваги та збереження міцності можна вирішити через використання легких композитних матеріалів або ж конструкцій із порожнистих профілів, які забезпечують достатню жорсткість при меншій вазі.

*Фізичне протиріччя* полягає у формулюванні протилежних фізичних вимог до системи або її певної частини.

Фізичні протиріччя в промисловості виникають, коли частина системи має одночасно відповідати протилежним фізичним вимогам.

Наприклад - для різального інструменту (наприклад, фрези чи свердла) потрібні два протилежні фізичні якості: лезо має бути дуже твердим, щоб забезпечити ефективне різання металу, але водночас - гнучким, щоб витримувати удари й не ламатися при навантаженнях. Фізичне протиріччя - твердість і гнучкість одночасно. Це протиріччя можна вирішити через створення багатошарових матеріалів або застосування покриттів: тверде зовнішнє покриття для різання й міцний, але гнучкий внутрішній шар для поглинання ударів.

Або, наприклад - крила літака мають бути одночасно жорсткими, щоб витримувати навантаження при польоті, і гнучкими, щоб знижувати опір повітрю та витримувати турбулентність. Фізичне протиріччя- жорсткість для стабільності конструкції та гнучкість для амортизації навантажень. Рішенням є використання композитних матеріалів, які

мають здатність забезпечувати потрібну жорсткість у потрібних місцях і гнучкість - у точках, що піддаються згинам.

Ці приклади демонструють, як фізичні протиріччя є основою для інновацій та розвитку нових рішень, що дозволяють досягти необхідного компромісу між протилежними вимогами в промисловості.

Залежність зміни основних показників системи від часу (життя технічної системи) має вигляд S-образної кривої (рисунок 3.1), на якій можна виділити наступні характерні ділянки:

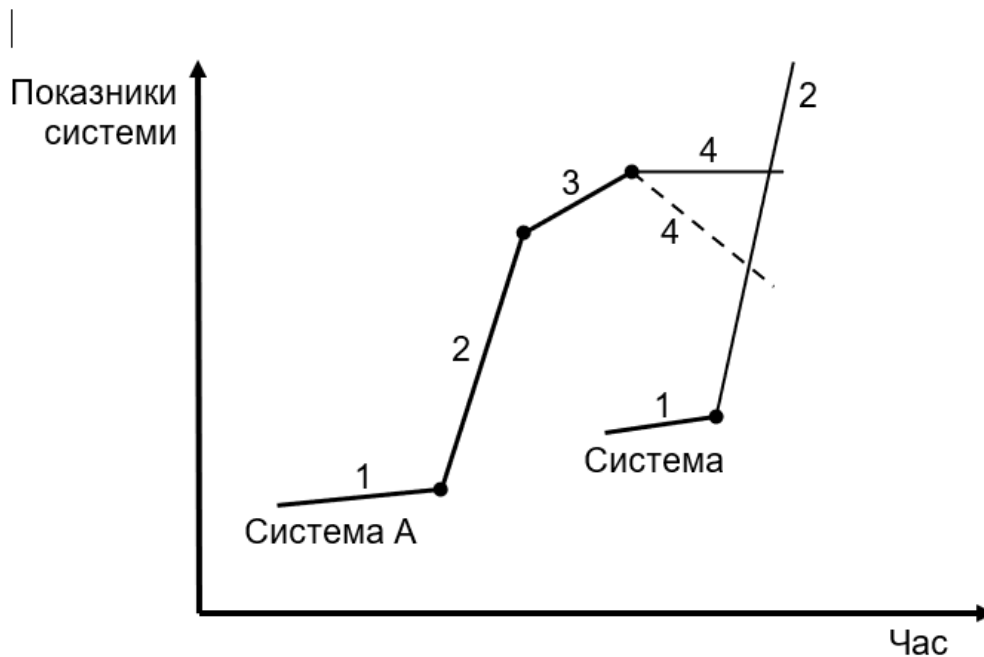
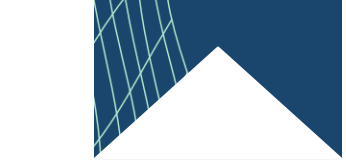


Рисунок 5.1 – Зміна основних показників системи від часу

«Дитинство системи» – етап повільного розвитку системи через відсутність інформації, нестачі засобів. На цьому етапі йдеться не лише про тестування, але й про визначення економічної доцільності та адаптивності системи до ринкових умов. Важливо оцінити потенційні шляхи розвитку, а також можливість інтеграції з іншими системами, щоб знизити ймовірність технічних обмежень у майбутньому

«Змужніння» – це фаза, коли система стабільно досягає ринкової доступності та активно вдосконалюється. На цьому етапі багато уваги приділяється оптимізації витрат на виробництво та підвищенню рентабельності, а також дослідженню користувацького досвіду. Важливим показником є здатність системи адаптуватися до нових вимог без суттєвих структурних змін.

В удосконалюванні системи бере участь велика кількість людей, залучається великий обсяг фінансових засобів. Відбувається всебічне



вдосконалювання основних вузлів, деталей системи. Однак принципових змін не відбувається.

«*Старість системи*», спад темпів розвитку – на цьому етапі показники ростуть слабо, тому що вичерпані можливості фізичних принципів, які лежать в основі системи, недостатньо засобів для відновлення системи, відбувається зношування при експлуатації та інше. Окрім зниження темпів розвитку, часто спостерігається підвищення вартості підтримки системи. На цьому етапі актуальним стає питання про можливість заміни компонентів або інтеграції із сучаснішими технологіями, щоб продовжити життєвий цикл системи без повної заміни.

*Стабільність або деградація параметрів системи в період заміни її на нову.*

Система переходить до стадії завершення життєвого циклу, коли підтримка стає економічно недоцільною. Часто відбувається поступовий перехід до нової системи з поступовим виходом старої з експлуатації, що потребує ретельного планування для мінімізації втрат.

У деякий момент часу виникає нова система В, що заснована на іншому фізичному принципі та перевищує показники системи А (наприклад, у процесі розвитку механічних транспортних засобів мінялися їх фізичні основи та конструкції: паровоз – тепловоз – електровоз – поїзд на магнітній подушці).


Прикладом, що ілюструє S-криву розвитку системи, є еволюція технологій зберігання інформації — від магнітних касет до сучасних флеш-накопичувачів. Цей процес пройшов усі етапи життєвого циклу, характерні для S-кривої:

*Дитинство системи* - магнітні стрічки. На цьому етапі, у 1950-60-х роках, магнітні касети стали першим способом зберігання цифрової інформації. Цей метод був повільним та громіздким, але відкрив нові можливості, дозволяючи зберігати й відтворювати дані. Проте інформація зчитувалася повільно, і промисловість лише починала експериментувати з використанням такої технології.

*Змужніння системи* - жорсткі диски (HDD). З 1970-х по 1990-ті роки жорсткі диски значно вдосконалили технології зберігання. На цьому етапі відбувалося швидке зростання обсягів пам'яті, зменшення розмірів і підвищення швидкості зчитування даних. Жорсткі диски почали широко використовуватися в персональних комп'ютерах і серверних системах, що стало поштовхом для розвитку інформаційних технологій. Інвестиції та розробки швидко збільшували ефективність, однак принцип зберігання інформації залишався майже незмінним.

*Старість системи* - твердотільні накопичувачі (SSD).

У 2000-х роках SSD-диски стали конкурентами HDD, демонструючи швидший доступ до даних і менші розміри. Однак HDD досі



використовуються у випадках, коли потрібна велика ємність за нижчою ціною. Хоча жорсткі диски ще мають свої ніші, їхнє вдосконалення вже не дає значного приросту ефективності, а виробники починають шукати нові технології зберігання.

*Стабільність або деградація системи* - заміна новою технологією (флеш-пам'ять та хмарне зберігання). З 2010-х років флеш-пам'ять та хмарні технології почали витісняти HDD та SSD, особливо у мобільних пристроях та для віддаленого зберігання даних. Флеш-пам'ять має високу швидкість та невеликі розміри, тоді як хмарне зберігання надає доступ до даних через інтернет. Ці технології вже базуються на нових принципах і продовжують розвиватися, поступово витісняючи попередні покоління.

Тобто, ця еволюція від касет до флеш-пам'яті ілюструє S-криву з усіма етапами, де кожна наступна технологія досягала обмеження своєї продуктивності, поступаючись місцем інноваціям із новими фізичними основами та можливостями.

S-образна крива наочно демонструє типову динаміку розвитку будь-якої технічної системи, де початкове повільне зростання змінюється різким підйомом, після чого настає стагнація.


Розуміння стадії, на якій перебуває система, може допомогти у прийнятті стратегічних рішень:

- на початковій фазі потрібно інвестувати в дослідження та розробки;
- у фазі зростання варто масштабувати виробництво та розширювати ринок;
- у фазі насичення можна розглянути можливість диверсифікації або пошуку нових технологій для підтримки зростання.

S-крива є важливим інструментом для прогнозування та оцінки потенціалу системи, допомагає визначити, коли варто підтримувати поточні технології, а коли - інвестувати в нові рішення для забезпечення подальшого розвитку.

В рамках системного аналізу, крім S-кривої, корисно застосовувати й інші моделі прогнозування, такі як моделі *Бассета* чи *Лотки-Вольтерра* для прогнозування взаємодії між різними системами.

*Модель Бассета* (також відома як модель Баса або модель дифузії Баса) є моделлю, яка використовується для прогнозування поширення нових продуктів чи технологій серед споживачів. Вона базується на припущенні, що потенційні користувачі поділяються на дві групи: «*інноваторів*» (які приймають нововведення самостійно) і «*імітаторів*» (які приймають нововведення під впливом інших). Модель описується рівнянням, де кількість нових користувачів у кожен момент часу залежить від ймовірності того, що вони є інноваторами або імітаторами. Формула Бассета для темпу прийняття нововведення виглядає так (5.1):



$$\frac{dN(t)}{dt} = (p + q \cdot N(t)) \cdot (M - N(t)) \quad (5.1)$$

де  $N(t)$  – кількість користувачів, що прийняли нововведення до моменту часу  $t$ ,

$M$  – загальна кількість потенційних користувачів,

$p$  – коефіцієнт інновацій, що визначає ймовірність прийняття нововведення інноваторами,

$q$  – коефіцієнт імітацій, що описує ймовірність прийняття нововведення під впливом інших.

*Модель Лотки-Вольтерра* (або модель хижак-жертва) описує динаміку взаємодії двох видів: «хижаків» та «жертв» у екосистемі, і використовується для моделювання взаємозалежних систем. Модель представлена двома диференційними рівняннями (5.2):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \alpha x - \beta xy \\ \frac{dy}{dt} &= \delta xy - \gamma y \end{aligned} \quad (5.2)$$

де  $x$  – кількість жертв,

$y$  – кількість хижаків,

$\alpha$  – темп приросту популяції жертв за відсутності хижаків,

$\beta$  – ймовірність того, що хижаки зустрічають жертв (вплив хижаків на жертв),

$\delta$  – коефіцієнт зростання популяції хижаків через споживання жертв,

$\gamma$  – коефіцієнт смертності хижаків за відсутності жертв.

Модель Лотки-Вольтерра є класичним інструментом для вивчення взаємодії конкурентних чи взаємопов'язаних систем, оскільки дозволяє описати циклічні коливання популяцій хижаків та жертв, які можуть відображати взаємозалежність і вплив однієї системи на іншу в часі.

Заміна однієї системи іншою на основі нових фізичних принципів є частиною еволюції технічних систем. Це явище підпорядковується законам розвитку, таким як закон переходу до надсистеми (заміна застарілих елементів більш ефективними технологіями) або закон підвищення ступеня динамічності (адаптивність системи до змін).



## 5.2 Закони розвитку технічних систем

Розвиток технічних систем відбувається відповідно до певних закономірностей, які можна назвати законами розвитку технічних систем. Розуміння цих законів є важливим для прогнозування змін, удосконалення наявних рішень та створення нових, більш ефективних систем. Сформульовані в рамках теорії розв'язання винахідницьких завдань (ТРИЗ), ці закони відображають накопичений досвід у розробці та оптимізації технічних рішень у різних галузях промисловості.

*Закони розвитку технічних систем дають змогу:*

- оцінювати стан і потенціал розвитку системи, виявляти її сильні та слабкі сторони;
- прогнозувати тенденції еволюції технічних систем, щоб вчасно запроваджувати необхідні зміни;
- знаходити та вирішувати протиріччя, що виникають у процесі вдосконалення системи, відкриваючи нові можливості для її розвитку.

Існують загальні закони розвитку технічних систем, засновані на концепції життєвого циклу виробу. Серед них виділяють:

- статичні закони, що визначають умови та принципи виникнення систем;
- кінематичні закони, що визначають напрямки та принципи розвитку систем;
- динамічні закони, які відбивають тенденції розвитку систем.

*До статичних законів відносять:*

- *закон повноти частин системи* – означає, що для нормального функціонування система повинна містити всі необхідні компоненти, які забезпечують виконання її основних функцій. Це є умовою життєздатності системи: якщо бракує хоча б одного ключового елемента, система не зможе ефективно функціонувати або взагалі втратить здатність виконувати свої завдання;

- *закон енергетичної провідності* – стверджує, що для ефективної роботи будь-якої системи необхідно забезпечити безперервне надходження енергії, матеріалів і інформації до всіх її частин, що беруть участь у їх обробці або передачі. Інакше кажучи, кожен компонент, який відповідає за певний етап роботи системи, має отримувати ресурси для своєї функції без затримок або перешкод;

- *закон узгодження ритміки частин системи* – говорить про необхідність синхронізації роботи всіх частин системи для забезпечення її ефективності. Цей принцип особливо важливий у складних системах, де багато компонентів працюють одночасно, оскільки будь-який збій у синхронізації може призвести до порушення загального процесу.

*До кінематичних законів відносять:*

– *закон підвищення ступеня ідеальності системи* - це принцип, який стверджує, що будь-яка технічна або організаційна система з часом прагне до підвищення свого ступеня ідеальності. Ідеальність системи визначається як співвідношення між корисними функціями, які вона виконує, та витратами на її функціонування, що включає ресурси, енергію, час, людські зусилля та інші види витрат. Прикладом цього закону є розвиток засобів зв'язку: від дротових телефонів, які вимагали великої інфраструктури, до сучасних мобільних смартфонів, які мають більше функцій за менших витрат енергії, часу та зусиль;

– *закон нерівномірності розвитку частин системи* – різні елементи (компоненти) однієї системи часто розвиваються з різною швидкістю або в різний спосіб. Це призводить до технічних протиріч або конфліктів між компонентами, які можуть обмежувати продуктивність або ефективність всієї системи. Такі протиріччя потребують вирішення для забезпечення гармонійного функціонування системи;

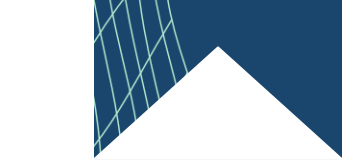
– *закон переходу в надсистему* – передбачає, що система може стати частиною більшої, складнішої структури для досягнення вищої ефективності. Іншими словами, окремі системи об'єднуються в надсистему, щоб спільно досягати цілей, які вони не могли б реалізувати самостійно. Паралельно елементи системи також можуть розвиватися, виділятися та набувати нових властивостей у процесі цієї інтеграції.

*До динамічних законів розвитку систем* відносяться закони, що описують еволюцію та зміни в системах з урахуванням змін функціональних механізмів і структури. Серед них, окрім закону переходу з макро- на мікрорівень, виділяють наступні:

- *закон збільшення ступеня динамізації*. Цей закон передбачає поступову заміну статичних елементів системи на динамічні, що здатні змінювати свої властивості або стан відповідно до вимог середовища. Наприклад, замість жорсткої механічної структури використовуються адаптивні або гнучкі матеріали, які можуть пристосовуватися до зовнішніх змін;

- *закон підвищення енергоефективності*. Полягає у поступовій заміні енергоємних процесів на більш енергоефективні. Замість витратних з точки зору енергії механічних процесів поступово впроваджуються альтернативні технології, такі як використання відновлювальних джерел енергії або енергозберігаючих технологій;

- *закон підвищення інформаційної щільності*. Цей закон передбачає заміну громіздких, об'ємних носіїв інформації на більш компактні, які здатні зберігати більшу кількість даних у меншому обсязі. Прикладом є перехід від фізичних архівів і паперових носіїв до цифрових форматів та мікросхем;



- *закон мініатюризації*. Відповідно до цього закону, системи еволюціонують у напрямку зменшення розмірів компонентів, переходячи від макроскопічних до мікроскопічних та наномасштабів. Це дозволяє підвищити функціональні можливості системи без збільшення її розмірів або маси;

- *закон розвитку через дроблення та диференціацію функцій*. Відбувається поділ функцій системи на більш вузькоспеціалізовані завдання, що дозволяє кожному елементу виконувати більш точні та ефективні операції. Такий підхід застосовується у біологічних та технічних системах, де для кожної функції формується свій елемент.

Ці *динамічні закони* визначають спрямованість розвитку систем, забезпечуючи їх адаптацію до зовнішніх умов і підвищуючи ефективність функціонування за рахунок переходу на нові принципи роботи.

Ці закони дозволяють глибше розуміти, як системи можуть переходити на новий рівень ефективності та ідеальності. Наприклад, закон ідеальності спонукає до створення систем, що потребують мінімального втручання користувача. Знання цих законів може допомогти інженерам, науковцям та керівникам виробничих процесів приймати стратегічні рішення для покращення продукції, оптимізації процесів і подолання технологічних бар'єрів, що ускладнюють розвиток.

### **5.3 Критерії розвитку технічних систем**

Серед параметрів технічних систем є такі, які монотонно поліпшуються з часом при вдосконалюванні технічної системи. Вони виступають як міра досконалості технічної системи та її прогресивності. Такі параметри та показники називають *критеріями розвитку* технічної системи.

Критерії розвитку технічних систем визначають основні параметри, за якими можна оцінювати прогрес у створенні та вдосконаленні технічних рішень. Вони є своєрідними орієнтирами, які допомагають зрозуміти, наскільки технічна система відповідає сучасним вимогам та чи має вона потенціал для подальшого розвитку.

Вивчення критеріїв розвитку технічних систем дозволяє інженерам, науковцям і керівникам виробництв:

- виявляти ефективні напрямки вдосконалення систем, підвищуючи їхню продуктивність, надійність і відповідність ринковим потребам;

- порівнювати різні технічні рішення і обирати найперспективніші для впровадження в практику;

- оцінювати рівень інноваційності системи, визначаючи її конкурентні переваги.

Критерії розвитку технічних систем включають:

- *ідеальність* - ступінь досягнення максимальної корисності за мінімальних витрат;

- *надійність* - здатність системи стабільно працювати в заданих умовах без відмов;

- *ефективність* - відношення результату роботи до ресурсів, витрачених на досягнення цього результату;

- *гнучкість* - здатність адаптуватися до зміни вимог чи умов роботи;

- *екологічність* - мінімізація шкідливого впливу на довкілля під час роботи та утилізації системи.

Набори критеріїв розвитку для різних класів технічних систем у значній мірі збігаються, тобто розвиток техніки визначається єдиним набором критеріїв. На рисунку 5.1 наведений перелік, що не претендує на повноту, але дозволяє конструкторові, технологіві, розроблювачеві програмного забезпечення та ЕОМ сформулювати та описати набір критеріїв розвитку для конкретної технічної системи. Аналіз кількісного вираження для кожного критерію дозволяє встановити рівень розвитку технічної системи та поставити цілі її вдосконалення.

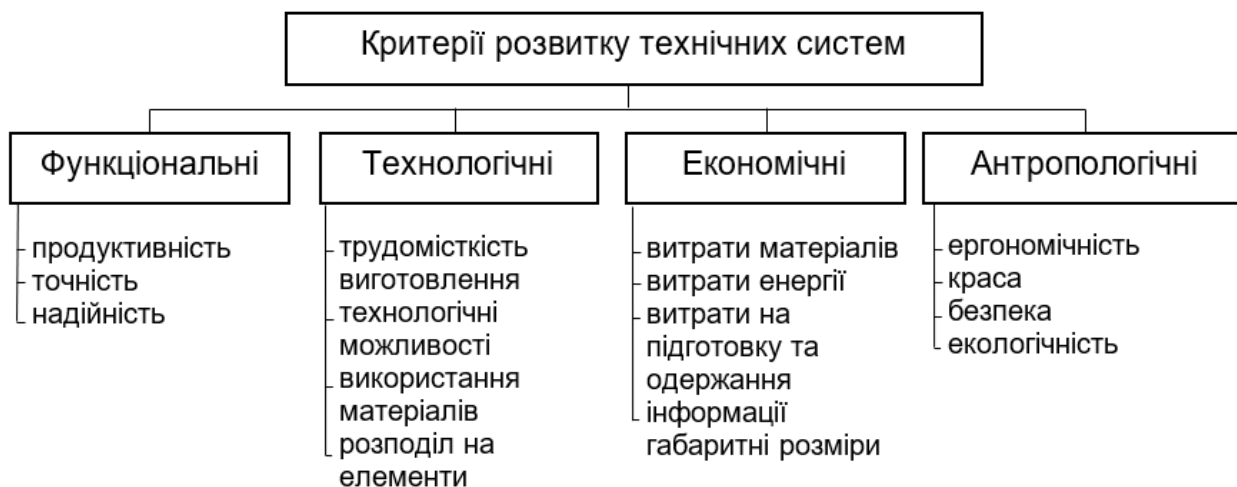



Рисунок 5.1 – Класифікація критеріїв розвитку технічних систем

Критерії розвитку підпорядковуються наступним вимогам:

- *умова вимірності* – за критерій розвитку можуть бути прийняті тільки такі параметри, які допускають можливість кількісної оцінки;

- *умова порівнянності* – критерій розвитку повинен мати такі одиниці виміру, які дозволяють зіставляти критерії розвитку різних



технічних систем у різних країнах та у різний час; найкраще для цього підходять безрозмірні або питомі величини;

- *умова виключення* – за критерії розвитку можуть бути прийняті такі параметри технічної системи, які характеризують її ефективність і впливають на її розвиток; якщо такі параметри не враховувати, то знижується споживча цінність системи та можливі невірні шляхи розвитку або відсутність розвитку системи;

- *умова сталості* – вимагає, щоб умова виключення постійно виконувалася в процесі життєвого циклу системи;

- *умова мінімальності та незалежності* – вся сукупність критеріїв розвитку повинна містити тільки незалежні критерії, які не є наслідком (логічним, математичним тощо) інших критеріїв.

Після виділення критеріїв розвитку дається їх опис у наступній формі:

- 1 Сутність критерію, час та причини його виникнення.

- 2 Формула або спосіб виміру критерію, вказівка шкали або одиниць виміру.

- 3 Діапазон та характер зміни значення критерію в часі.

- 4 Оцінка спільності критерію по трибальній шкалі: 1 бал – критерій має відношення до розглянутого класу технічних систем з однаковими або близькими функціями; 2 бали – критерій має відношення до декількох класів технічних систем з різними функціями, але певними загальними властивостями; 3 бали – універсальний критерій, що має відношення до всіх систем з будь-якими функціями. Спільність критеріїв указує на можливість запозичення поліпшених технічних рішень з інших областей техніки.

- 5 Оцінка зміни відносної значимості (актуальності) критерію в минулому та доступному для огляду майбутньому (актуальність критерію зростає, залишається незмінною, убуває).

- 6 Основні способи та засоби поліпшення критерію.

Критерії розвитку технічних систем звичайно використовують як критерії оптимізації або як їх складові. Для загального розвитку властивостей і цінностей систем найчастіше використовують економічні критерії розвитку, тому що вони є інтегральною характеристикою якості, а для їх опису потрібні відносно прості залежності.

Використання критеріїв розвитку допомагає виявити сильні й слабкі сторони системи, визначити пріоритети для модернізації та спланувати кроки для її подальшого вдосконалення. Удосконалення технічної системи за ключовими критеріями сприяє підвищенню її конкурентоспроможності, дозволяє знижувати витрати на виробництво і експлуатацію та забезпечує тривалу відповідність сучасним вимогам.

## 5.4 Функціональні критерії розвитку технічних систем

Для кожної технічної системи функціональні критерії розвитку являють собою кількісну характеристику основних показників реалізації функцій технічної системи, тобто ці критерії виявляють на основі аналізу опису функцій технічної системи. Оскільки функції технічних систем характеризуються всілякими показниками, тоді практично неможливо дати вичерпний перелік функціональних критеріїв. У зв'язку з цим розглядають тільки деякі, найбільш часто діючі функціональні критерії. Серед них можна виділити три групи критеріїв:

- *критерії продуктивності;*
- *критерії точності;*
- *критерії надійності.*

*Критерій продуктивності* завжди може бути обмірюваний або обчислений. Структура формули для обчислення критерію та одиниця виміру продуктивності можуть бути всілякими. Критерій продуктивності являє собою інтегральний показник рівня розвитку техніки, що безпосередньо залежить від ряду параметрів, які визначальним чином впливають на продуктивність праці. Ці параметри являють собою приватні функціональні критерії, до них відносяться:

- швидкість обробки об'єкта (число обертів або операцій в одиницю часу, швидкість руху робочих органів машини, протікання хімічної реакції тощо);
- фізичні та хімічні параметри (температура, тиск, напруга тощо), які визначальним чином впливають на інтенсивність обробки об'єкта;
- ступінь механізації праці;
- ступінь автоматизації праці;
- безперервність процесу обробки.


*Критерії точності* включають наступні приватні критерії:

- точності виміру;
- точності обробки матеріалу або речовини;
- точності обробки потоку енергії;
- точності обробки потоку інформації.

Для цих приватних критеріїв розроблені способи виміру та оцінки точності, які легко знайти в спеціальній літературі.

Під *надійністю* технічної системи звичайно мають на увазі її здатність без відмов виконувати свої функції з заданою ймовірністю протягом певного інтервалу часу. *Критерій надійності* зростає зі збільшенням часу та імовірності безвідмовної роботи системи.

Критерії продуктивності, точності та надійності являють собою монотонно зростаючі функції. Актуальність і вага цих критеріїв завжди



була вище в порівнянні з іншими групами критеріїв і згодом продовжує зростати.

## 5.5 Технологічні критерії розвитку технічних систем

*Група технологічних критеріїв* головним чином забезпечує всебічну економію живої праці при виготовленні технічних систем та підготовці їх до експлуатації. Крім того, ці критерії спрямовані на економію матеріалів, яка залежить від технологічних факторів, що знову ж вносить певну частку в економію живої праці. Можна виділити чотири основних технологічних критерії.

*Критерій трудомісткості виготовлення технічної системи.* Критерій дорівнює відношенню сумарної трудомісткості проектування, виготовлення та підготовки до експлуатації системи  $T_c$  до його головного показника ефективності  $Q$ , тобто являє собою питому трудомісткість виготовлення на одиницю ефективності (5.3):

$$K_T = \frac{T_c}{Q} \quad (5.3)$$

Головний показник ефективності  $Q$  вибирають таким чином, щоб критерій  $K_T$  об'єктивно відображав прогресивний розвиток розглянутих технічних систем (наприклад, для двигуна головним показником ефективності може виступати потужність, що він розвиває). Критерій  $K_T$  являє собою функцію, яка монотонно убиває, за умови, що зіставлення різних поколінь технічних систем ведеться по тому самому показнику ефективності  $Q$ .

*Критерій технологічних можливостей* відображає фактор спадковості в техніці. При переході від одного покоління технічної системи до іншого критерій змушує в найбільшій мірі зберігати та використовувати перевірені практикою функціональні елементи, відпрацьовану технологію їх виготовлення та існуюче технологічне обладнання, оскільки за кожну конструктивну зміну в новому поколінні технічної системи доводиться платити значними додатковими витратами, пов'язаними зі зміною технологічного процесу та створенням відповідного технологічного обладнання, пристосувань та інструментів, тим більшим є ризик, що нові елементи не виправдають себе на практиці.

*Критерій використання матеріалів* (5.4). Для виготовлення елементів технічної системи використовуються різні природні матеріали, відлиті заготовки, сортовий та листовий прокат, труби різних профілів,

спеціальні профільні заготовки (вали, кулі, шестірні тощо). У процесі обробки вихідного матеріалу та заготовок з'являються обрізки, стружка та інші відходи, у результаті чого маса готових деталей та, відповідно, технічної системи виходить меншою, ніж маса витрачених матеріалів. У зв'язку з цим витрати, наприклад, чорних металів у машинобудуванні становлять 20-25 %, відходи металу в стружку при обробці різанням – до 28 %. У цілому коефіцієнт використання металу не перевищує звичайно 0,55 (тобто відходи становлять 45 %).

Оскільки частка відходів залежить від технологічних процесів і технологічного обладнання, існує та діє технологічний критерій використання матеріалів  $K_{BM}$ , який дорівнює відношенню маси виробу  $G$  до маси витрачених матеріалів  $P$  (при цьому покупні комплектуючі елементи не враховуються):

$$K_{BM} = \frac{G}{P} \quad (5.4)$$

У випадку, коли для виготовлення технічної системи використовуються матеріали, що значно розрізняються за вартістю, при обчисленні критерію рекомендується користуватися наступними залежностями (5.5):

$$G = \sum_{i=0}^m k_i q_i \quad (5.5)$$

$$P = \sum_{i=0}^m k_i p_i$$


де  $i = 0, 1, \dots, m$  – номери різних матеріалів, що використовуються;

$k_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го матеріалу (можна прийняти  $k_i = c_i/c_0$ , де  $c_i$  – вартість одиниці маси  $i$ -го матеріалу;  $c_0$  – вартість одиниці маси основного матеріалу);

$q_i$  – маса  $i$ -го матеріалу, який використано в елементах технічної системи;

$p_i$  – маса  $i$ -го матеріалу, витраченого на виготовлення елементів технічної системи.

Критерій являє собою функцію, яка монотонно зростає та приймає значення в інтервалі від 0 до 1. Незважаючи на тенденцію монотонного зростання, функція іноді має східчасті (стрибкоподібні) убавання,



звичайно пов'язані з переходом на нові технологічні процеси зі значно більшою продуктивністю або з використанням нових більш дешевих матеріалів.

Критерій використання матеріалів можна назвати коефіцієнтом корисного використання матеріалів, оскільки за змістом, характером та діапазоном змін він близький до енергетичного коефіцієнта корисної дії.

*Критерій розчленовування технічної системи на елементи.* Майже кожен технічну систему можна виконати з істотно меншого числа елементів (вузлів та деталей), чим вона зроблена насправді. Наприклад, деякі прості вузли можна виготовити у вигляді однієї нероз'ємної деталі, окремі вузли об'єднати однією станиною та інше. Така мінімізація числа елементів дає, здавалося б, певний виграв за рахунок виключення елементів сполучення та з'єднання (зменшується загальна маса виробу, підвищується його жорсткість і надійність, зменшується трудомісткість механічної обробки та зборки тощо). Однак таке гадане спрощення конструкції, поряд з зазначеними позитивними моментами, часто приносить незрівнянно більші втрати. Справа в тому, що більше розчленовування часто скорочує час і трудомісткість розробки та доведення системи в цілому, оскільки в кожному новому виробі, як би добре він не був спроектований, є більш та менш досконалі вузли. Тому в процесі розробки та доведення нового виробу економічніше та простіше усувати недоліки окремих більш простих вузлів, чим складних вузлів або виробу в цілому. Більше розчленовування технічної системи на вузли та деталі полегшує та розширює уніфікацію та стандартизацію з властивими їм перевагами, дозволяє надмірно складні (з погляду виготовлення) за конструкцією елементи збирати з простих однотипних елементів.

Таким чином, завжди існує оптимальне розчленовування технічної системи на вузли та деталі, що значно спрощує технологію розробки, доведення, виготовлення, ремонт та модернізацію виробів, є основою для уніфікації та стандартизації.

Критерій розчленовування технічної системи на елементи забезпечує в кожному новому поколінні виробів наближення до оптимального поділу на елементи.

## **5.6 Економічні критерії розвитку технічних систем**

*Критерій витрат матеріалів.* Всебічна економія матеріалів при розробці та виготовленні технічних систем викликана рядом факторів. До основних причин зменшення витрат матеріалів відносяться:

- зниження вартості технічної системи, оскільки вартість матеріалів у технічних системах становить 25-65 % їх собівартості;
- зниження транспортних та вантажно-розвантажувальних витрат під час перевезення вихідної сировини та матеріалів для виготовлення технічної системи та при транспортуванні готових технічних систем до місця їх використання;
- економія енергії при експлуатації технічних систем, у яких значна частина енергії витрачається на забезпечення поступального, зворотно-поступального, обертального та іншого видів механічного руху.

Критерій витрат матеріалів дорівнює відношенню маси технічної системи  $G$  до її головного показника ефективності  $Q$ :

$$K_{BM} = \frac{G}{P} \quad (5.5)$$

тобто являє собою питому масу матеріалів на одиницю ефективності.

*Критерій витрат енергії.* При виготовленні та експлуатації технічних систем, як правило, витрачається певна кількість енергії. Оскільки задоволення зростаючих потреб людей звичайно жорстко обмежується наявними енергетичними можливостями, то зазначені витрати енергії завжди прагнуть звести до мінімуму (5.6). У зв'язку з цим існує та діє критерій витрат енергії:

$$K_{BE} = \frac{W_n + E}{TQ} \quad (5.6)$$

де  $W_n$  – повні витрати енергії за час експлуатації технічної системи;  
 $E$  – витрати енергії при виготовленні технічної системи;  
 $T$  – час експлуатації технічної системи.

Критерій являє собою монотонно убутну в часі функцію за умови, що порівняння різних поколінь технічних систем ведеться по тому самому порівнянному показнику ефективності  $Q$ .

*Критерій витрат на інформаційне забезпечення.* Останнім часом у зв'язку з широким використанням обчислювальної техніки з'явилися та зросли витрати на підготовку та обробку інформації при створенні та експлуатації багатьох технічних систем. Ці витрати стають порівнянними з витратами на матеріали та енергію, а прибутки від них швидко зростають. У зв'язку з цим з'явилася необхідність введення критерію витрат на інформаційне забезпечення у вигляді відносини (5.7):


$$K_{BI} = \frac{S}{Q} \quad (5.7)$$

де  $S$  – витрати на підготовку та обробку інформації, що включають вартість або експлуатацію обчислювальної техніки, розробку (або оренду) програмного та інформаційного забезпечення.

Критерій являє собою монотонно убутну функцію. Однак критерій може мати стрибки, коли додаткові значні витрати  $S$  пов'язані з переходом на принципово нову перспективну обчислювальну техніку, що відразу не дає випереджального підвищення ефективності технічних систем.

### 5.7 Антропологічні критерії розвитку технічних систем


Група антропологічних критеріїв забезпечує максимальну відповідність та пристосування технічних систем до людини, зниження дискомфорту при їх експлуатації, зниження або виключення шкідливих та небезпечних впливів технічних систем на людину.

*Критерій ергономічності технічних систем.* Ефективність багатьох технічних систем у значній мірі залежить від того, наскільки вони пристосовані до психофізіологічних якостей людини-оператора, що використовує цю технічну систему або керує нею при впливі на предмет обробки, тобто наскільки в системі «людина-машина» використані фізичні, психічні та інтелектуальні можливості людини.

Властивість системи «людина-машина» змінювати свою ефективність залежно від ступеня використання можливостей людини-оператора називають *ергономічністю*. Критерій ергономічності для конкретної технічної системи дорівнює відношенню реалізованої ефективності системи «людина-машина» до максимально можливої ефективності цієї системи. Він являє собою залежну від часу монотонно зростаючу функцію, що прагне до своєї межі, рівній одиниці.

Критерій ергономічності можна інтерпретувати як коефіцієнт корисної дії людини в системі «людина-машина», тим більш, що границя та характер зміни значень цього критерію такі ж, як в енергетичного коефіцієнта корисної дії.

*Критерій безпеки технічної системи.* Багато технічних систем, а також продукція, що випускається ними, та сировина, яка використовується при виробництві, робить або може зробити на працюючих та оточуючих людей різні шкідливі або небезпечні впливи.



У зв'язку з цим виділяється критерій безпеки, облік якого дозволяє створити тенденцію зниження або виключення впливу шкідливих та небезпечних впливів на людину при розвитку технічних систем.

Варто помітити, що коли ведеться оцінка шкідливих впливів технічних систем на людину, поряд з технічною системою, що проектується, аналогічні шкідливі впливи можуть робити й інші технічні системи, що експлуатуються разом з тією, що проектується. У таких випадках розглядається питання не тільки про неможливість створення нової технічної системи, але й про виключення існуючих технічних систем, які мають свою частку в порушенні нормативів.


*Критерій екологічності.* Критерій екологічності, або критерій збереження навколишнього середовища, повинен регулювати взаємини між природною середою та технічною системою з погляду комфортності та можливості життя людей.

Слід зазначити, що жорсткий вплив критерію не має на увазі абсолютного припинення небажаних забруднень та змін природи. Цей критерій, у першу чергу, повинен впливати на вибір засобів мінімального впливу на природу, на серйозне обґрунтування нормативів забруднення та зміни середовища, порушення яких приносить більшу шкоду в порівнянні з користю або взагалі неприпустимо. Під засобами мінімального впливу на природу розуміється також широке використання компенсаційних заходів, які забезпечують у цілому зменшення або стабілізацію критерію.

## **5.8 Якість функціонування систем. Показники якості та ефективності**

*Якість та ефективність* функціонування системи є ключовими параметрами, що визначають її здатність досягати поставлених цілей, адаптуватися до змінних умов, а також відповідати очікуванням користувачів чи замовників. У сучасних умовах складність систем – від інформаційних до технічних – постійно зростає, що висуває особливі вимоги до оцінки їхньої якості та ефективності. Різноманітні характеристики та властивості систем дозволяють оцінити її з погляду швидкодії, надійності, стійкості та ресурсомісткості. З огляду на це, важливо вміти визначити, якими показниками оцінюється функціонування системи, і які критерії дозволяють вважати її ефективною.

*Показники якості* системи відображають її здатність стабільно виконувати функції при мінімальних витратах ресурсів, а також її здатність адаптуватися до умов, що змінюються. Оцінка таких показників є



критичною під час розробки, тестування та оптимізації системи, що особливо важливо в інженерії, ІТ та управлінні.

Істотні властивості системи можна класифікувати за *загальносистемними, структурними та функціональними* групами. Кожна з них має свої особливості та застосовується для оцінки різних аспектів роботи системи. Наведемо детальніше характеристики кожної з цих груп властивостей і розглянемо приклади їх застосування.

*Загальносистемні властивості (універсальні).* Ці властивості є базовими, вони характеризують основні якості системи, необхідні для її стабільного функціонування. До них відносять такі характеристики:

- *швидкодія* – здатність системи швидко обробляти інформацію або виконувати операції. Наприклад, для серверів швидкодія означає, скільки запитів вони можуть обробити за одиницю часу, що є критичним показником для веб-сайтів з великою кількістю відвідувачів;

- *завантаження* – ступінь зайнятості окремих блоків системи або їх сукупності. Наприклад, у системах виробництва це може означати середню зайнятість виробничого обладнання в процесі виробництва;

- *цілісність* – здатність системи зберігати дані та функції у незмінному вигляді, попереджаючи несанкціонований доступ або модифікацію. Наприклад, у банківській системі цілісність забезпечується спеціальними протоколами безпеки;

- *стійкість* – здатність системи функціонувати навіть при наявності відмов окремих компонентів. Наприклад, у авіаційній системі, якщо один із двигунів виходить з ладу, стійкість системи забезпечується завдяки резервному двигуну;


- *ефективність* – здатність системи досягати цілей за мінімальних витрат ресурсів. Наприклад, автоматизовані логістичні системи, що знижують затрати на перевезення товарів;

- *спостережуваність* – можливість моніторингу та контролю над системою. Для автомобільних систем це означає можливість відслідковувати параметри роботи двигуна та інших компонентів в реальному часі;

- *керованість* – здатність системи змінювати свій стан за командою оператора. Наприклад, системи управління будівельною технікою, які дозволяють змінювати режими роботи машин;

- *детермінованість* – передбачуваність результатів при однакових вхідних умовах. Наприклад, у системах автоматичного контролю якості одна й та ж деталь повинна проходити перевірку за аналогічним алгоритмом;

- *відкритість* – можливість інтеграції нових елементів або модулів. Наприклад, програмне забезпечення з відкритим кодом, яке дозволяє іншим розробникам додавати новий функціонал;



- *динамічність* – здатність змінюватися в часі або адаптуватися до нових умов. Наприклад, CRM-системи, що оновлюються з урахуванням нових вимог користувачів.

*Структурні властивості.* Ці властивості характеризують внутрішню організацію та зв'язність елементів системи:

- *состав* – сукупність компонентів, з яких складається система. Наприклад, інформаційна система включає апаратну і програмну частини, а також мережеві компоненти;

- *зв'язність* – характер взаємозв'язків між елементами. Для мережевої системи зв'язність відображає, як сервери і клієнти пов'язані один з одним через канали зв'язку;

- *організація* – рівень упорядкованості і координації між компонентами. Наприклад, в організації мережевого обладнання забезпечується злагоджене функціонування маршрутизаторів та комутаторів;

- *складність* – відображає кількість і різноманітність елементів та зв'язків між ними. Наприклад, у кіберфізичних системах складність полягає в багатогранності інтегрованих механічних, електронних і програмних компонентів;

- *масштабність* – можливість розширення системи без погіршення її характеристик. Наприклад, масштабованість хмарних обчислень дозволяє збільшувати обчислювальні потужності за потреби;

- *просторовий розмах* – фізичне розташування елементів системи. Наприклад, у розподілених мережах IoT пристрої розташовані на великих відстанях один від одного;

- *централізованість* – ступінь залежності елементів від центрального компоненту. Наприклад, в системі управління підприємством централізованість означає контроль із головного офісу;

- *обсяг* – кількість елементів системи або обсяг даних. Наприклад, обсяг бази даних компанії може характеризувати її масштаби та інтенсивність обробки інформації.

*Функціональні властивості.* Ці властивості характеризують ефективність системи у виконанні її функцій:

- *результативність* – здатність досягати цільового результату. Наприклад, у системі навігації результативність – це здатність визначати маршрут без помилок;

- *ресурсомісткість* – обсяг ресурсів, що витрачається на виконання функцій. Наприклад, у виробничих лініях ресурсомісткість оцінюється через витрати матеріалів та енергії на виготовлення одиниці продукції;

- *оперативність* – швидкість реакції на зміни або запити. Наприклад, оперативність інформаційної системи для бізнесу означає



швидкість обробки запитів клієнтів;

- *активність* – здатність системи працювати за власною ініціативою, без постійного контролю. Наприклад, автономні дрони виконують місії самостійно, уникаючи перешкод;

- *потужність* – здатність виконувати великі обсяги роботи за одиницю часу. Наприклад, потужність обчислювальних серверів визначається кількістю оброблюваних запитів на секунду;

- *мобільність* – можливість переміщення або зміни місця роботи. Наприклад, мобільні роботизовані системи здатні переміщатися між різними ділянками виробництва;

- *продуктивність* – кількість виконаних операцій за певний час. У виробництві продуктивність вимірюється кількістю виготовлених одиниць продукції;

- *швидкодія* – аналогічно швидкодії в загальносистемних властивостях, але орієнтована саме на виконання певних функцій. Наприклад, у роботизованих виробничих лініях швидкодія визначає темп виконання операцій;

- *готовність* – ймовірність успішного виконання завдань у потрібний момент. Наприклад, у медичних системах готовність означає здатність апарату до негайного запуску в екстрених випадках;

- *працездатність* – тривалість безперебійного виконання функцій. Наприклад, у промислових роботах працездатність – це час, протягом якого вони працюють без збоїв;


- *точність* – здатність виконувати функції без похибок. Наприклад, точність вимірювальних приладів важлива для забезпечення якості продукції;

- *економічність* – мінімізація витрат на забезпечення функціонування. Наприклад, енергоефективність будівлі є важливою для зниження витрат на її обігрів та освітлення.

Кожна з цих властивостей допомагає всебічно оцінити ефективність системи, її здатність до адаптації, надійність і відповідність поставленим цілям.

## **5.9 Показники та критерії ефективності функціонування систем**

*Ефективність функціонування системи* є ключовим критерієм, який визначає її здатність досягати поставлених цілей з мінімальними витратами ресурсів і у задані часові рамки. Показники ефективності дозволяють оцінити не лише якість результатів, які система забезпечує, але й те, наскільки раціонально вона використовує свої ресурси для їхнього



досягнення. У складних ієрархічних та динамічних системах правильний вибір таких показників є критично важливим для підтримання їх стабільності, адаптації до змін середовища і досягнення поставлених цілей.

Для ефективного функціонування будь-якої системи важливо враховувати як її загальносистемні та структурні властивості, так і показники, що відображають результати виконання операцій та процесів, для яких система була створена. Показники якості функціонування системи можна поділити на кілька основних категорій.

*Загальносистемні та структурні властивості.* Ці властивості описують загальні якості системи, які можуть бути використані для її оцінки незалежно від конкретного завдання. Вони включають показники, що характеризують рівень організації, зв'язності, стійкості, керованості та масштабності системи. Наприклад:

- *швидкодія та завантаження* дозволяють оцінити наскільки оперативно система реагує на вхідні сигнали та чи ефективно використовує свої ресурси;
- *стійкість* системи свідчить про її здатність функціонувати навіть за умов відмов або зовнішніх впливів;
- *централізованість і організація* показують, наскільки злагоджено взаємодіють елементи системи і як вона реагує на зміни структури.


*Операційні властивості*, які характеризують безпосередній процес функціонування системи, адже штучні системи, як правило, створюються для виконання конкретних операцій і досягнення певного результату. Основними аспектами оцінки операційних властивостей є:

- *результат операції* – чи досягнуто поставленої цілі;
- *алгоритм виконання операції* – ефективність та оптимальність процесу, що забезпечує досягнення цієї цілі.

Оцінка операційних властивостей відбувається через конкретні показники якості операцій. Розглянемо три основні показники, що визначають якість операцій системи:

*Результативність (R).* Результативність операції визначається цільовим ефектом, заради якого функціонує система. Вона свідчить про здатність системи виконувати поставлені завдання з досягненням бажаних результатів. Наприклад, в автоматизованій системі виробництва результативність може означати кількість одиниць продукції, виготовлених за визначений проміжок часу, а у медичних інформаційних системах результативність може означати точність діагностики або успішність лікування пацієнтів.

*Ресурсомісткість (M).* Ресурсомісткість характеризується обсягом ресурсів усіх видів, що використовуються для досягнення цільового ефекту: людські, матеріально-технічні, енергетичні, інформаційні та



фінансові ресурси. Цей показник дозволяє оцінити, наскільки ефективно система витрачає ресурси. Наприклад, у промислових процесах ресурсомісткість може виражатися в кількості сировини, що використовується для виготовлення продукції, або енергетичних витратах на одиницю продукту, в ІТ-системах це може бути використання обчислювальних потужностей або споживання електроенергії під час обробки даних.

*Оперативність (O).* Оперативність визначає, скільки часу витрачається на досягнення цілі операції, і відображає швидкість реакції системи на змінні умови або запити. Наприклад, у транспортних системах оперативність може бути представлена часом доставки товарів до клієнтів, у системах обробки даних оперативність оцінюється як час відправки запиту до моменту отримання результату.

*Комплексний показник ефективності процесу.*

Узгоджена робота всіх трьох показників - результативності, ресурсомісткості та оперативності - породжує комплексну властивість *ефективності процесу (операцій)*, яка визначає рівень пристосованості системи до досягнення поставлених цілей. Ефективність є інтегральним показником, що поєднує характеристики всіх інших операційних властивостей системи та відображає її здатність забезпечувати цілісне і раціональне виконання функцій. Ефективність процесу залежить як від внутрішніх властивостей системи (структури, організації), так і від впливу зовнішніх факторів (наприклад, змін у середовищі функціонування).

*Комплексний показник ефективності операції (E) може бути виражений через математичну модель, де кожен з компонентів – результативність (R), ресурсомісткість (M) і оперативність (O) – має свій ваговий коефіцієнт (5.8):*

$$E = \omega_1 R + \omega_2 M + \omega_3 O \quad (5.8)$$

де  $E$  – ефективність операції;

$R$  – результативність;


$M$  – ресурсомісткість;

$O$  – оперативність;

$\omega_1 \omega_2 \omega_3$  – вагові коефіцієнти, які визначають важливість кожного з компонентів в залежності від конкретної мети операції.

Вагові коефіцієнти можуть змінюватися в залежності від пріоритетів, визначених для даної операції. Це дозволяє адаптувати критерій ефективності до специфіки кожної ситуації.

*Вибір відповідного критерію ефективності* – важливий і багато в чому суб'єктивний процес, що потребує творчого підходу та врахування



особливостей кожної системи. Існують різні критерії, залежно від специфіки системи та цілей, які ставляться перед нею. Наприклад, для виробничих систем критерієм ефективності може бути мінімізація витрат при одночасному збереженні якості продукції, а для систем обслуговування клієнтів важливими критеріями є задоволеність клієнтів та швидкість обробки запитів.

Процес вибору критерію ефективності є особливо складним для ієрархічних систем, де рішення мають узгоджуватися на кількох рівнях. Критерій повинен враховувати всю сукупність показників, що відображають результативність, ресурсомісткість та оперативність процесів, а також бути достатньо гнучким для адаптації до змін середовища.

У деяких випадках показники результативності можуть включати ресурсомісткість або оперативність, однак для комплексної оцінки ефективності всі три характеристики мають розглядатися в сукупності.

Таким чином, Вибір правильного критерію ефективності та формування показників результативності, ресурсомісткості та оперативності дозволяє більш точно оцінити операцію та виявити можливості для її покращення. Системи з різними цілями та умовами функціонування потребують індивідуального підходу до оцінки ефективності, що є важливим аспектом у їх розвитку та оптимізації.

## **5.10 Висновки до теми**

У процесі вивчення теми було розглянуто сутність, показники та критерії, що визначають якість і ефективність функціонування технічних систем. З'ясовано, що якість відображає ступінь відповідності системи своїм функціональним вимогам, а ефективність - здатність досягати поставлених цілей з мінімальними витратами ресурсів.

Визначено, що комплексна оцінка системи має ґрунтуватися на поєднанні функціональних, технологічних, економічних та антропологічних критеріїв, які дозволяють отримати повну картину її стану та потенціалу розвитку.

Особливу увагу приділено життєвому циклу системи, законам і критеріям її розвитку, що забезпечують підвищення надійності, продуктивності, енергоефективності та екологічності.

Таким чином, системний підхід до оцінювання якості та ефективності дозволяє своєчасно виявляти слабкі місця, оптимізувати структуру й функції системи, підвищувати її конкурентоспроможність і забезпечувати стабільне функціонування в умовах динамічного технічного прогресу.



## ТЕМА 6. МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ СИСТЕМ

Оцінювання та порівняння систем є одним із ключових етапів системного аналізу, що дозволяє визначати ефективність, надійність і доцільність використання різних альтернатив. У практиці проектування складних технічних, економічних і соціальних систем важливо мати інструменти, які дають змогу зіставляти показники, виявляти найкращі варіанти та формувати обґрунтовані рішення.

У межах цієї теми розглядаються методи якісного та кількісного оцінювання, зокрема експертні, морфологічні, сценарні, ситуаційні та методи теорії корисності. Вивчення цих підходів забезпечує формування у студентів навичок об'єктивного порівняння систем і вибору оптимальних рішень у складних умовах.

### 6.1 Методи якісного оцінювання систем


Методи оцінювання систем розподіляються на *якісні* та *кількісні*.

*Якісні методи* використовуються на початкових етапах моделювання, якщо реальна система не може бути виражена в кількісних характеристиках, відсутні описи закономірностей системи у вигляді аналітичних залежностей. У результаті такого моделювання розробляється *концептуальна модель системи*.

*Кількісні методи* використовуються на наступних етапах моделювання для кількісного аналізу варіантів системи.

Між цими крайніми методами є й такі, за допомогою яких прагнуть охопити всі етапи моделювання від постановки задачі до оцінки варіантів, але для представлення задачі оцінювання залучають різні вихідні концепції та термінологію з різним ступенем формалізації. До них відносять:

- кібернетичний підхід до розробки адаптивних систем керування, проектування та прийняття рішень, відповідно до якого прийняття рішень по керуванню системою базується на результатах аналізу інформації, що циркулює в системі;
- інформаційно-гносеологічний підхід до моделювання систем, що заснований на спільності процесів пізнання систем різної фізичної природи;
- структурний та об'єктно-орієнтований підходи системного аналізу;

- 
- метод ситуаційного моделювання, основою якого є формалізація знань про систему у вигляді набору логічних правил, за якими може бути здійснений обґрунтований вибір альтернативних рішень;
  - метод імітаційного динамічного моделювання.

Такі методи дозволяють розробляти як концептуальні, так і строго формалізовані моделі, що забезпечують необхідну якість оцінки систем.

У всіх методах зміст *задачі оцінювання* полягає в зіставленні розглянутої системи та вектора з критеріального простору, координати точок якого розглядаються як оцінки за відповідними критеріями.

Найпростішою формою задачі оцінювання є *задача виміру*, коли оцінювання є порівнянням з еталоном, а рішення задачі знаходиться шляхом підрахунку числа етальонних одиниць у об'єкті, що вимірюється. Більш складні задачі оцінювання розподіляються на задачі парного порівняння, ранжирування, класифікації, чисельної оцінки.

*Задача парного порівняння* полягає у виявленні кращого з двох наявних об'єктів.

*Задача ранжирування* полягає в упорядкуванні об'єктів, що утворюють систему, за убутанням або зростанням значення деякої ознаки.

*Задача класифікації* полягає у віднесенні заданого елемента до однієї з підмножин.

*Задача чисельної оцінки* полягає в протиставленні системі одного або декількох чисел.


Перераховані задачі можуть бути вирішені безпосередньо особою, що приймає рішення, або за допомогою експертів-фахівців у досліджуваній області. У другому випадку рішення задачі оцінювання називається *експертизою*.

До основних методів якісного оцінювання систем відносять:

- методи експертних оцінок;
- методи мозкової атаки (та інші методи колективної генерації ідей);
- методи сценаріїв;
- методи Дельфі;
- морфологічні методи;
- методи рішення творчих задач.

## **6.2 Методи експертних оцінок**

Група методів експертних оцінок найбільш часто використовується в практиці оцінювання складних систем на якісному рівні. При використанні



експертних оцінок звичайно передбачається, що думка групи експертів надійніша, ніж думка окремого експерта.

Вся множина проблем, розв'язуваних методами експертних оцінок, ділиться на два класи. До першого класу відносяться такі, у відношенні яких є достатнє забезпечення інформацією. При цьому методи опитування та обробки ґрунтуються на використанні принципу «гарного вимірника», тобто передбачається, що експерт – джерело достовірної інформації, а групова думка експертів близька до істинного рішення. До другого класу відносяться проблеми, у відношенні яких знань для впевненості та справедливості зазначених гіпотез недостатньо. У цьому випадку експертів не можна розглядати як «гарних вимірників» і необхідно обережно підходити до обробки результатів експертизи.

Експертні оцінки несуть у собі як вузько суб'єктивні риси, властиві кожному експертові, так і колективно-суб'єктивні, властиві колегії експертів. І якщо перші усуваються в процесі обробки індивідуальних експертних оцінок, то другі не зникають, які б способи обробки не застосовувалися.


При проведенні експертизи виділяють наступні етапи: формування цілі, розробка процедури експертизи, формування групи експертів, опитування, аналіз та обробка інформації.

При формулюванні цілі експертизи розроблювач повинен виробити чітке уявлення про те, ким і для яких цілей будуть використані результати.

При обробці матеріалів колективної експертної оцінки використовуються методи теорії рангової кореляції. Для кількісної оцінки ступеня погодженості думок експертів застосовується *коефіцієнт конкордації*  $W$ , що дозволяє оцінити, наскільки погоджені між собою ряди переваги, побудовані кожним експертом. Його значення перебуває в межах  $0 \leq W \leq 1$ , де  $W = 1$  означає повну протилежність, а  $W = 0$  – повний збіг ранжировок. Практично вірогідність експертизи вважається гарною, якщо  $W = 0,7 - 0,8$ .

Мале значення коефіцієнта конкордації, яке свідчить про слабку погодженість думок експертів, є наслідком того, що в розглянутій сукупності експертів дійсно відсутня спільність думок або усередині розглянутої сукупності експертів існують групи з високою погодженістю думок, однак узагальнені думки таких груп протилежні.

Для наочності уявлення про ступінь погодженості думок двох будь-яких експертів А і В служить коефіцієнт парної рангової кореляції  $r$ . Він приймає значення  $-1 \leq r \leq +1$ . Значення  $r = +1$  відповідає повному збігу оцінок у рангах двох експертів, а значення  $r = -1$  – двом взаємно протилежним ранжировкам важливості властивостей, тобто думка одного експерта протилежна думці іншого.



Тип використовуваних процедур експертизи залежить від задачі оцінювання. До найбільш уживаних процедур експертних вимірів відносяться:

- ранжирування;
- парне порівняння;
- множинне порівняння;
- безпосередня оцінка;
- метод послідовного порівняння (метод Черчмена-Акоффа);
- метод Терстоуна;
- метод фон Неймана-Моргенштерна.

Доцільність застосування того або іншого методу багато в чому визначається характером інформації, яка аналізується. Якщо виправдані лише якісні оцінки об'єктів за деякими якісними ознаками, то використовуються методи ранжирування, парного та множинного порівняння.


Якщо характер інформації, що аналізується, такий, що доцільно одержати чисельні оцінки об'єктів, то можна використати будь-який метод чисельної оцінки, починаючи від безпосередніх чисельних оцінок і закінчуючи більш тонкими методами Терстоуна та фон Неймана-Моргенштерна.

При розгляді кожного з методів будемо припускати, що є кінцеве число вимірюваних або оцінюваних альтернатив  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$  та сформульовані один або кілька ознак порівняння, по яких здійснюється порівняння властивостей об'єктів. Методи виміру будуть розрізнятися лише процедурою порівняння об'єктів.

### 6.2.1 Ранжирування

Метод являє собою процедуру впорядкування об'єктів, яка виконується експертом. На основі знань та досвіду експерт розташовує об'єкти у порядку переваги, керуючись одним або декількома обраними показниками порівняння. Залежно від виду відносин між об'єктами можливі різні варіанти впорядкування об'єктів.

Нехай серед об'єктів немає однакових за порівнюваними показниками, тобто немає еквівалентних об'єктів. У цьому випадку між об'єктами існує тільки відношення строгого порядку. У результаті порівняння всіх об'єктів по відношенню строгого порядку складається впорядкована послідовність  $a_1 > a_2 > \dots > a_n$ , де об'єкт з першим номером є найбільш переважним з всіх об'єктів, об'єкт з другим номером менш переважний, чим перший об'єкт, але переважніше всіх інших



об'єктів тощо. Отримана система об'єктів з відношенням строгого порядку за умови порівнянності всіх об'єктів по цьому відношенню утворить повний строгий порядок. Для цього відношення існує числова система, елементами якої є дійсні числа, зв'язані між собою відношенням нерівності «>». Це означає, що впорядкуванню об'єктів відповідає впорядкування чисел  $x_1 > x_2 > \dots > x_n$ , де  $x_i = \varphi(a_i)$ .

На практиці ранжирування найчастіше застосовують числове подання послідовності у вигляді натуральних чисел (6.1):

$$x_1 = \varphi(a_1) = 1, x_2 = \varphi(a_2) = 2, \dots, x_n = \varphi(a_n) \quad (6.1)$$

Числа  $x_1, x_2, \dots, x_n$  у цьому випадку називають *рангами* та звичайно позначають буквами  $r_1, r_2, \dots, r_n$ .

Застосування строгих чисельних відносин «більше» (>), «менше» (<) або «дорівнює» (=) не завжди дозволяє встановити порядок між об'єктами. Тому поряд з ними використовуються відносини для визначення більшого або меншого ступеня якісної ознаки: відносини типу «більш переважно» ( $\succ$ ), «менш переважно» ( $\prec$ ), «рівноцінно» ( $\approx$ ) або «байдуже» ( $\sim$ ). Упорядкування об'єктів при цьому може мати, наприклад, наступний вид:  $a_1 \succ a_2 \succ a_3 \approx a_4 \approx a_5 \succ \dots \succ a_6$ .

Таке впорядкування утворить нестрогий лінійний порядок. Для відношення нестроого лінійного порядку існує числова система з відносинами нерівності та рівності між числами, що описують властивості об'єктів.

У практиці ранжирування об'єктів, між якими допускаються відносини як строгого порядку, так і еквівалентності, числове подання вибирається в такий спосіб. Найбільш кращому об'єкту привласнюється ранг, який дорівнює одиниці, другому по перевазі – ранг, рівний двом, і так далі. Для еквівалентних об'єктів зручно з погляду технології майбутньої обробки експертних оцінок призначати однакові ранги, які рівні середньому арифметичному значень рангів, що надають однаковим об'єктам. Такі ранги називають *зв'язаними рангами*. Для наведеного прикладу впорядкування на основі нестроого лінійного порядку при  $n = 10$  ранги об'єктів  $a_4, a_5$  будуть рівними  $r_3 = r_4 = r_5 = (3 + 4 + 5)/3 = 4$ .

При груповому ранжируванні кожен  $j$ -й експерт привласнює кожному  $i$ -му об'єкту ранг  $r_{ij}$ . У результаті проведення експертизи виходить матриця рангів  $\|r_{ij}\|$  розмірності  $n \cdot k$ , де  $n$  – число об'єктів (альтернатив),  $k$  – число експертів. Результати групового експертного ранжирування зручно представити у вигляді таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Таблиця для подання результатів групового ранжирування

Об'єкт	Експерт 1	Експерт 2	...	Експерт $k$
$a_1$	$r_{11}$	$r_{12}$	...	$r_{1k}$
$a_2$	$r_{21}$	$r_{22}$	...	$r_{2k}$
...	...	...	...	...
$a_n$	$r_{n1}$	$r_{n2}$	...	$r_{nk}$

Аналогічний вид має таблиця, якщо здійснюється ранжирування об'єктів одним експертом за декількома показниками порівняння. У цьому випадку в таблиці 6.1 замість експертів у відповідних графах вказуються показники. Слід зазначити, що ранги об'єктів визначають тільки порядок розташування об'єктів за показниками порівняння. Ранги як числа не дають можливості зробити вивід про те, на скільки або в скільки разів переважніше один об'єкт у порівнянні з іншим.

Достоїнство ранжирування як методу експертного виміру полягає в простоті здійснення процедур, не потребуючого трудомісткого навчання експертів. Недоліком ранжирування є практична неможливість упорядкування великої кількості об'єктів. Як показує досвід, при числі об'єктів, більшому 10-15, експерти затрудняються в побудові відносини переваги. Це пояснюється тим, що в процесі ранжирування експерт повинен установити взаємозв'язок між всіма об'єктами, розглядаючи їх як єдину сукупність. При збільшенні числа об'єктів кількість зв'язків між ними росте пропорційно квадрату числа альтернатив. Збереження в пам'яті та аналіз великої сукупності взаємозв'язків між об'єктами обмежуються психологічними можливостями людини. Психологія затверджує, що оперативна пам'ять людини дозволяє оперувати в середньому не більш ніж  $7 \pm 2$  об'єктами одночасно. Тому при ранжируванні великої кількості об'єктів експерти можуть допускати істотні помилки.

### 6.2.2 Парне порівняння

Цей метод являє собою процедуру встановлення переваги об'єктів при порівнянні всіх можливих пар. На відміну від ранжирування, у якому здійснюється впорядкування всіх об'єктів, парне порівняння об'єктів є більш простою задачею. При порівнянні пари об'єктів можливо або відношення строгого порядку, або відношення еквівалентності.

У результаті порівняння пари об'єктів  $a_i$ ,  $a_j$  експерт упорядковує їх, висловлюючи або  $a_i \succ a_j$ , або  $a_i \prec a_j$ , або  $a_i \approx a_j$ . Вибір числового подання

$\varphi(a_i)$  можна зробити так: якщо  $a_i \succ a_j$ , то  $\varphi(a_i) > \varphi(a_j)$ ; якщо перевага в парі зворотне, то знак нерівності замінюється на зворотний, тобто  $\varphi(a_i) < \varphi(a_j)$ . Якщо об'єкти еквівалентні, то можна вважати, що  $\varphi(a_i) = \varphi(a_j)$ .

На практиці парного порівняння використовуються наступні числові подання  $x_{ij} = \varphi(a_j)$  (6.2).

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a_i \succ a_j \text{ або } a_i \approx a_j \\ 0, & \text{якщо } a_i \prec a_j, \quad i, j = \overline{1, n} \end{cases} \quad (6.2)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{якщо } a_i \succ a_j \\ 1, & \text{якщо } a_i \approx a_j \\ 0, & \text{якщо } a_i \prec a_j \text{ або } a_i \approx a_j \end{cases}$$

Результати порівняння всіх пар об'єктів зручно представляти у вигляді матриці (табл. 6.2). Нехай є 5 об'єктів:  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  і проведене парне порівняння цих об'єктів по перевазі. Результати порівняння представлені у вигляді


$a_1 \succ a_2, a_1 \succ a_3, a_1 \succ a_4, a_1 \prec a_5, a_2 \succ a_3, a_2 \succ a_4, a_2 \prec a_5, a_3 \approx a_4, a_3 \prec a_5, a_4 \prec a_5$ .

Використовуючи перше числове подання, складемо матрицю виміру результатів парних порівнянь (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Матриця рангів при парному порівнянні альтернатив

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$a_1$	1	1	1	1	0
$a_2$	0	1	1	1	0
$a_3$	0	0	1	1	0
$a_4$	0	0	1	1	0
$a_5$	1	1	1	1	1

Якщо порівняння пар об'єктів проводиться окремо за різними показниками або порівняння здійснює група експертів, то по кожному



показнику або експертові складається своя таблиця результатів парних порівнянь. Порівняння всіх можливих пар не дає повного впорядкування об'єктів, тому виникає задача ранжирування об'єктів за результатами їх парного порівняння.


Однак, як показує досвід, експерт далеко не завжди послідовний у своїх перевагах. У результаті використання методу парних порівнянь експерт може вказати, що об'єкт  $a_1$  переважніше об'єкта  $a_2$ ,  $a_2$  переважніше об'єкта  $a_3$  та у той же час  $a_3$  переважніше об'єкта  $a_1$ . У випадку розбивки об'єкта на класи експерт може до одного класу віднести пари  $a_1$  та  $a_2$ ,  $a_2$  та  $a_3$ , але в той же час об'єкти  $a_1$  та  $a_3$  віднести до різних класів. Така непослідовність експерта пояснюється різними причинами: складністю задачі, неочевидністю переваги об'єктів або розбивкою їх на класи, недостатньою компетентністю експерта, недостатньо чіткою постановкою задачі, багатокритеріальністю об'єктів, що розглядаються.

### 6.2.3 Множинне порівняння

Метод множинного порівняння відрізняється від методу парного порівняння тим, що експертам послідовно пред'являються не пари, а трійки, четвірки, ...,  $m$  – ки ( $m < n$ , де  $n$  – кількість альтернатив, що розглядається) об'єктів. Експерт упорядковує їх по важливості або розбиває на класи залежно від цілей експертизи. Множинне порівняння займає проміжне положення між парним порівнянням та ранжируванням. З одного боку, воно дозволяє використати більший, ніж при парному порівнянні, обсяг інформації для визначення експертного судження в результаті одночасного співвіднесення об'єкта не з одним, а з більшим числом об'єктів. З іншого боку, при ранжируванні об'єктів їх може виявитися занадто багато, що ускладнює роботу експерта та позначається на якості результатів експертизи. У цьому випадку множинне порівняння дозволяє зменшити до розумних меж обсяг інформації, що надходить до експерта.

### 6.2.4 Безпосередня оцінка

Метод полягає в присвоюванні об'єктам числових значень у шкалі інтервалів. Експертові необхідно поставити у відповідність кожному об'єкту крапку на певному відрізку числової осі. При цьому необхідно, щоб еквівалентним об'єктам приписувалися однакові числа.



Вимір в шкалі інтервалів може бути досить точними при повній інформованості експертів про властивості об'єктів. Такі умови на практиці зустрічаються рідко, тому для виміру застосовують бальну оцінку. При цьому замість безперервного відрізка числової осі розглядають ділянки, яким приписуються бали.

Експерт, приписуючи об'єкту бал, тим самим вимірює його з точністю до певного відрізка числової осі. Застосовуються 5-, 10- та 100- бальні шкали.

### 6.2.5 Метод Черчмена-Акоффа (метод послідовного порівняння)


Цей метод відноситься до числа найбільш популярних при оцінці альтернатив. У ньому передбачається послідовне коректування оцінок, зазначених експертами. Основні припущення, на яких заснований метод, полягають у наступному:

- кожній альтернативі  $a_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) ставиться у відповідність дійсне ненегативне число  $\varphi(a_i)$ ;
- якщо альтернатива  $a_i$  переважніше альтернативи  $a_j$ , тоді  $\varphi(a_i) > \varphi(a_j)$ ,
- якщо ж альтернативи  $a_i$  та  $a_j$  рівноцінні, то  $\varphi(a_i) = \varphi(a_j)$ ;
- якщо  $\varphi(a_i)$  та  $\varphi(a_j)$  – оцінки альтернатив  $a_i$  та  $a_j$ , то  $\varphi(a_i) + \varphi(a_j)$ , відповідає спільному здійсненню альтернатив  $a_i$  та  $a_j$ .

Відповідно до методу Черчмена-Акоффа альтернативи  $a_1, a_2, \dots, a_n$  ранжируються по перевазі. Експерт зазначає попередні чисельні оцінки  $\varphi(a_i)$  для кожної з альтернатив. Найбільш переважній альтернативі приписується оцінка 1, інші оцінки розташовуються між 0 та 1 відповідно до їх переваги. Потім експерт робить порівняння альтернативи  $a_1$  і суми альтернатив  $a_2, \dots, a_n$ . Якщо  $a_1$  переважніше, тоді експерт коректує оцінки так, щоб  $\varphi(a_1) > \sum_{i=2}^n \varphi(a_i)$ . У протилежному випадку повинна виконуватися нерівність  $\varphi(a_1) \leq \sum_{i=2}^n \varphi(a_i)$ .

Після того як альтернатива  $a_1$  виявляється переважніше суми альтернатив  $a_2, a_3, \dots, a_n$ , вона виключається з розгляду, а замість оцінки альтернативи  $a_1$  розглядається та коректується оцінка альтернативи  $a_2$ . Процес триває доти, поки відкоректованими не виявляться оцінки всіх альтернатив.

При досить великому  $n$  застосування методу Черчмена-Акоффа стає занадто трудомістким. У цьому випадку доцільно розбити альтернативи на групи, а одну з альтернатив, наприклад максимальну,



включити в усі групи. Це дозволяє одержати чисельні оцінки (ранги) всіх альтернатив за допомогою оцінювання усередині кожної групи.

### 6.2.6 Метод фон Неймана-Моргенштерна

Метод полягає в одержанні чисельних оцінок альтернатив за допомогою так званих імовірнісних сумішей. В основі методу лежить припущення, відповідно до якого експерт для будь-якої альтернативи  $a_j$ , менш переважної, ніж  $a_i$ , але більш переважної, ніж  $a_l$ , може вказати число  $p$  ( $0 \leq p \leq 1$ ) таке, що альтернатива  $a_j$  еквівалентна змішаній альтернативі  $[pa_i, (1-p)a_l]$ . Змішана альтернатива полягає в тому, що альтернатива  $a_i$  вибирається з імовірністю  $p$ , а альтернатива  $a_l$  – з імовірністю  $1-p$ . Очевидно, що якщо  $p$  досить близько до 1, то альтернатива  $a_j$  менш переважна, чим змішана альтернатива  $[pa_i, (1-p)a_l]$ .


Якщо зазначена система переваг виконана, то для кожної з набору основних альтернатив  $a_1, a_2, \dots, a_n$  визначаються числа  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , які характеризують чисельну оцінку змішаних альтернатив.

Чисельна оцінка змішаної альтернативи  $[p_1a_1, p_2a_2, \dots, p_na_n]$  дорівнює  $x_1p_1 + x_2p_2 + \dots + x_np_n$ .

Змішана альтернатива  $[p_1a_1, p_2a_2, \dots, p_na_n]$  переважніше змішаної альтернативи  $[p_1a_1, p_2a_2, \dots, p_na_n]$ , якщо  $x_1p_1 + x_2p_2 + \dots + x_np_n > x_1p_1 + x_2p_2 + \dots + x_np_n$ .

Розглянуті вище методи експертних оцінок мають різні якості, але приводять у загальному випадку до близьких результатів. Практика застосування цих методів показала, що найбільш ефективно комплексне застосування різних методів для рішення однієї і тієї ж задачі. Порівняльний аналіз результатів підвищує обґрунтованість зроблених висновків. При цьому варто враховувати, що методом, що вимагає мінімальних витрат, є ранжирування, а найбільш трудомістким – метод послідовного порівняння Черчмена-Акоффа. Метод парного порівняння без додаткової обробки не дає повного впорядкування об'єктів.

### 6.3 Метод сканування



Метод використовується при першому осмисленні проблеми в широкому діапазоні ідей та підходів, які можуть застосовуватися для її рішення. Як правило, цей метод застосовують з ціллю попереднього вивчення нових проблем, для рішення яких відсутній практичний досвід.

Процедура, що покладена в основу методу сканування, полягає в наступному:

1 Створення групи експертів.

2 Кожен експерт повинен згенерувати ідею щодо способу або підходу до рішення проблеми або охарактеризувати цю проблему. Висловлення експертів оформляють у вигляді анотацій концептуального характеру. На цьому етапі ідеї, висловлені кожним експертом, не обговорюють. Іноді перевагу віддають анонімному способу висловлення та нагромадження ідей експертів.

3 Люди, які повинні приймати рішення (частина з яких могла належати до групи експертів), розглядають всі анотації експертів. Ціллю цього розгляду є кластеризація (розподіл на групи) всіх отриманих експертами ідей.

4 Люди, які приймають рішення, з усієї множини кластерів відбирають так називані конструктивні кластери, які вивчають та використовують на наступних етапах розгляду проблеми.


#### **6.4 Методи «мозкової атаки»**

Концепція «мозкова атака» одержала широке поширення в 50-х рр. як метод тренування мислення, націлений на відкриття нових ідей та досягнення згоди групи людей на основі інтуїтивного мислення. Методи цього типу відомі також під назвами «мозковий штурм», «конференція ідей», «колективна генерація ідей».

Звичайно при проведенні сесій мозкової атаки намагаються виконувати певні правила, суть яких:

- забезпечити як можна більшу волю мислення учасників «мозкової атаки» і висловлення ними нових ідей;
- вітати будь-які ідеї, навіть якщо спочатку вони здаються сумнівними або абсурдними (обговорення та оцінка ідей здійснюється пізніше);
- не допускати критики будь-якої ідеї, не оголошувати її помилковою та не припиняти обговорення;
- бажано висловлювати якнайбільше ідей, особливо нетривіальних.

Залежно від прийнятих правил та твердості їх виконання розрізняють пряму «мозкову атаку», метод обміну думками та інші види




колективного обговорення ідей та варіантів прийняття рішень. Останнім часом намагаються ввести правила, що допомагають сформувати деяку систему ідей, тобто пропонується вважати найціннішими ті з них, які пов'язані з раніше висловленими та являють собою їх розвиток та узагальнення. Учасникам не дозволяється зачитувати списки пропозицій, які вони підготували заздалегідь. У той же час, щоб попередньо націлити учасників на питання, що обговорюється, при організації сесій «мозкової атаки» заздалегідь або перед початком сесії їм представляється деяка попередня інформація про обговорювану проблему в письмовій або усній формі.

## 6.5 Методи сценаріїв

Методи підготовки та узгодження представлень про проблему або об'єкт, що аналізується, викладені в письмовому виді, одержали назву *сценарію*. Спочатку цей метод припускав підготовку тексту, що містить логічну послідовність подій або можливі варіанти рішення проблеми, упорядковані в часі. Однак вимога часових координат пізніше була знята, і сценарієм стали називати будь-який документ, що містить аналіз проблеми, що розглядається, або пропозиції по її рішення, незалежно від того, у якій формі він представлений.

Сценарій не тільки передбачає змістовні міркування, які допомагають не упустити деталі, які звичайно не враховують при формальному уявленні системи, але й містить результати кількісного техніко-економічного або статистичного аналізу з попередніми висновками, які можна одержати на їх основі. Група експертів, що готує сценарії, користується правом одержання необхідних довідок від різних організацій. Поняття сценаріїв розширюється в напрямку як областей застосування, так і форм подання та методів їх розробки: у сценарій не тільки вводяться кількісні параметри та устанавлюються їх взаємозв'язки, але й пропонуються методики складання сценаріїв з використанням ЕОМ.

Сценарій є попередньою інформацією, на основі якої проводиться подальша робота з прогнозування або розробки варіантів проекту. Таким чином, сценарій допомагає скласти думку про проблему, а потім приступити до більш формалізованого подання системи у вигляді графіків, таблиць для використання інших методів системного аналізу.



## 6.6 Метод Дельфі

На відміну від традиційних методів експертної оцінки метод Дельфі припускає повну відмову від колективних обговорень. Це робиться для того, щоб зменшити вплив таких психологічних факторів, як приєднання до думки найбільш авторитетного фахівця, небажання відмовитися від привселюдно вираженої думки, проходження за думкою більшості. У методі Дельфі прямі дебати замінені програмою послідовних індивідуальних опитувань, проведених у формі анкетування. Відповіді узагальнюються та разом з новою додатковою інформацією надходять у розпорядження експертів, після чого вони уточнюють свої первісні відповіді. Така процедура повторюється кілька разів до досягнення прийнятної сукупності висловлених думок.

Метод Дельфі спочатку був запропонований як ітеративна процедура «мозкової атаки», що повинна допомогти знизити вплив психологічних факторів та підвищити об'єктивність результатів. Однак майже одночасно Дельфі-процедури стали основним засобом підвищення об'єктивності експертних опитувань з використанням кількісних оцінок при розробці сценаріїв за рахунок використання зворотного зв'язку, ознайомлення експертів з результатами попереднього тура опитування та обліку цих результатів при оцінці значимості думок експертів.

Процедура методу Дельфі полягає в наступному:

- організується послідовність циклів «мозкової атаки»;
- розробляється програма послідовних індивідуальних опитувань за допомогою запитальників, що виключає контакти між експертами, але передбачається ознайомлення їх з думками один одного між турами; запитальники від тура до тура можуть уточнюватися;
- у найбільш розвинених методиках експертам привласнюються вагові коефіцієнти значимості їх думок, що обчислюють на основі попередніх опитувань, які уточнюють від тура до тура та враховують при одержанні узагальнених результатів оцінок.

Недоліками методу Дельфі є:

- значна витрата часу на проведення експертизи, пов'язана з більшою кількістю послідовних повторень оцінок;
- необхідність кількаразового перегляду експертом своїх відповідей, що викликає в нього негативну реакцію, яка позначається на результатах експертизи.

## 6.7 Морфологічні методи

Основна ідея *морфологічних методів* – систематично знаходити всі мислимі варіанти рішення проблеми або реалізації системи шляхом комбінування виділених елементів або їх ознак. У систематизованому виді морфологічний підхід розроблений та застосований уперше швейцарським астрономом Ф. Цвікі та довгий час був відомий як метод Цвікі.

Цвікі запропонував три методи морфологічного дослідження:

*Метод систематичного покриття поля*, заснований на виділенні так званих опорних пунктів знання в будь-якій досліджуваній області та використання для заповнення поля деяких сформульованих принципів мислення.

*Метод заперечення та конструювання*, що полягає в тім, що на шляху конструктивного прогресу стоять догми та компромісні обмеження, які є смисл заперечувати. Отже, сформулювавши деякі пропозиції, корисно замінити їх на протилежні та використати при проведенні аналізу.

*Метод морфологічного ящика*, що знайшов найбільш широке поширення. Ідея полягає в тому, щоб визначити всі мислимі параметри, від яких може залежати рішення проблеми, представити їх у вигляді матриць-рядків, а потім визначити в цьому морфологічному ящику (матриці) усілякі сполучення параметрів по одному з кожного рядка. Отримані в такий спосіб варіанти можуть знову піддаватися оцінці та аналізу з ціллю вибору найкращого. Морфологічний ящик може бути не тільки двовимірним.

Побудова та дослідження за методом морфологічного ящика проводиться в п'ять етапів/

*Етап 1.* Точне формулювання поставленої проблеми.

*Етап 2.* Виділення показників  $P_i$ , від яких залежить рішення проблеми. На думку Цвікі, при наявності точного формулювання проблеми виділення показників відбувається автоматично.

*Етап 3.* Визначення для показника  $P_i$  його можливих значень  $P_i^k$  та зведення цих значень у таблицю, що Цвікі називає морфологічним ящиком.

*Етап 4.* Оцінка всіх варіантів, що містяться в морфологічній таблиці.

*Етап 5.* Вибір з морфологічної таблиці найбільш бажаного варіанта рішення проблеми.



## **6.8 Методи організації пошуку нових рішень**

### **6.8.1 Метод гірлянд асоціацій**

У випадках, коли єдиною ознакою, що визначає ціль проектування, є новизна системи, можна скористатися методом гірлянд асоціацій. При використанні цього методу для базової системи-аналога підбираються схожі системи, а потім випадковим образом приводиться ряд інших систем. Кожну розглянуту систему доповнюють тими або іншими ознаками випадкових систем або асоціаціями, які вони викликають. Основний зміст методу полягає в тім, щоб зруйнувати стереотипні подання про систему.

При детальному розгляді більшість отриманих систем виявляться абсурдними. Однак, як показує практика, 10 – 15 % отриманих рішень містять цікаві ідеї та повинні розглядатися більш ретельно.

### **6.8.2 Метод ідеальної системи**


При використанні методу ідеальної системи перш, ніж відшукувати реальні технічні рішення, рекомендується пофантазувати, уявити собі ідеальне рішення поставленого завдання. Самим ідеальним рішенням буде таке, при якому ні проектувати, ні створювати систему не було б потрібно, але в той же час потреба в системі виявилася б вдоволеною. Якщо все-таки виникає необхідність щось створювати, то найкраще зробити це найбільш простим способом з всіх можливих (наприклад, для пересування пасажирів використати килим-літак).

Вибравши ідеальну систему або спосіб задоволення потреб, необхідно встановити перешкоди до їх практичної реалізації. Подальші зусилля по пошуку технічних рішень варто направити на визначення способів усунення виділених перешкод.

Недоліком методу ідеальної системи в більшості випадків є труднощі подання ідеального способу досягнення цілі.

## **6.9 Методи кількісного оцінювання систем**

Більшість приватних показників якості зв'язані між собою так, що підвищення якості системи по одному показнику веде до зниження якості



по іншому. Тому некоректно формулювати задачу одночасного підвищення якості за всіма показниками.

Наявність неоднорідних зв'язків між окремими показниками складних систем приводить до необхідності іти на компроміс та вибирати для кожної характеристики не оптимальне значення, а менше, але таке, при якому інші показники теж будуть мати прийнятні значення.

У цьому зв'язку були розроблені методи кількісної оцінки систем:

- методи теорії корисності;
- методи векторної оптимізації;
- методи ситуаційного керування.

Методи *теорії корисності* засновані на використанні відносини переваги множини векторних оцінок систем.

Методи *векторної оптимізації* базуються на евристичному використанні поняття векторного критерію якості систем (багатокритеріальні задачі). При рішенні задач векторної оптимізації векторний критерій ефективності, виражений через показники альтернатив, замінюють скалярним на основі функції згортки.

Методи *ситуаційного керування* засновані на побудові моделей оцінки систем, у яких система переваг особи, що приймає рішення, формалізується у вигляді набору логічних правил, за якими може бути здійснений вибір альтернатив. При цьому поняття векторного критерію в явному виді не використовується.

Розгляд зазначених підходів у системному аналізі засновано на трьох важливих особливостях.

По-перше, вважається, що не існує системи, найкращої в незалежному від людини розумінні. Завжди система може бути найкращою лише для даної людини. Інша людина в даних умовах може віддати перевагу альтернативній системі.

По-друге, вважається, що не існує оптимальної системи для всіх цілей і вплив зовнішнього середовища. Система може бути ефективною тільки для конкретної цілі та у конкретних умовах. В інших умовах і для інших цілей система може бути неефективною.

По-третє, математичні методи оптимізації операцій не повною мірою задовольняють вимогам, пропонованим до задач оцінювання складних організаційних систем, оскільки вид цільової функції або невідомий, або не заданий аналітично, або для неї відсутні засоби рішення.

### 6.9.1 Оцінка складних систем на основі теорії корисності

При аксіоматичному підході до оцінки систем на основі корисності використовується метод *згортання векторного критерію в скалярний*. Відмінність даного підходу від інших полягає в тому, що згортання проводиться на основі аналізу переваг аналітика. Природні відносини порядку на шкальних значеннях критеріїв тут не використовуються, тому що всі компоненти векторного критерію на основі переваг аналітика перетворюються у функції корисності компонентів і лише потім здійснюється згортання.

У теорії корисності виходять з того, що критерій ефективності призначений для виявлення порядку переваг альтернатив, що дозволяє забезпечити обґрунтований вибір рішення.

Виявити формально відношення переваги або байдужності безпосереднім порівнянням альтернатив важко: показники альтернатив численні, мають різний фізичний зміст і різні шкали вимірів (вартість виготовлення, чисельність обслуговуючого персоналу, коефіцієнт технічної готовності, пропускна здатність тощо).

Найчастіше використовується порівняно простий підхід до оцінки альтернатив – упорядкування їх по зростанню корисності від найменш корисних до найбільш корисних. Своє відношення до альтернатив можна виразити й кількісно, приписавши кожній альтернативі деяке число, що визначає його відносну перевагу. Наприклад, найменш корисна альтернатива може бути відбита числом 1, наступна – числом 2 і так далі до найбільш корисної альтернативи.

Таким чином, корисність альтернативи – це дійсне число, яке приписане альтернативі та характеризує її перевагу в порівнянні з іншими альтернативами щодо цілі.

Знаючи можливі альтернативи з їх показниками корисності, можна побудувати функцію корисності (рис.6.1), що дає основу для порівняння та вибору рішень. Функція корисності являє собою числову обмежену функцію  $F(a)$ , зазначену на множині альтернатив  $A = \{a_i\}, i = 1, n$ , так, що  $F(a_i) = F(a_j)$ , коли альтернативи  $a_i$  та  $a_j$  нерозрізнені ( $a_i \sim a_j$ ), тобто не можна віддати перевагу ні тієї, ні іншій альтернативі, і  $F(a_i) > F(a_j)$ , коли альтернатива  $a_i$  переважніше альтернативи  $a_j$  ( $a_i \succ a_j$ ).

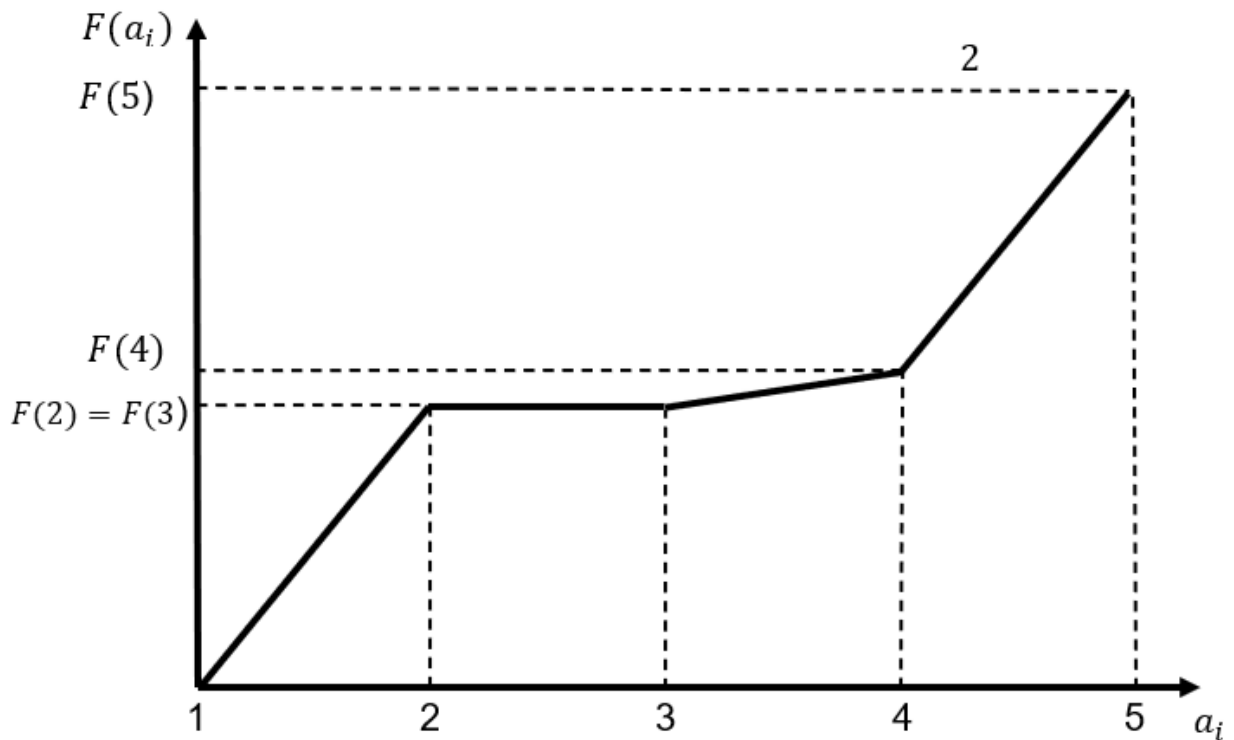


Рисунок 6.1 – Приклад функції корисності

Розглянемо основні аксіоми теорії корисності.


**Аксіома 1. Вимірність.** Кожному альтернативному варіанту  $a_i$  може бути поставлене у відповідність ненегативне дійсне число  $a = p_i$ , розглянуте як міра відносної корисності альтернативи  $a_i, i = 1, n$ .

**Аксіома 2. Порівнянність.** Будь-які дві альтернативи  $a_i$  та  $a_j$  порівнянні: або одна альтернатива переважніше іншій, або альтернативи однаково переважні.

**Аксіома 3. Транзитивність.** Співвідношення переваги та еквівалентності альтернатив транзитивні. Якщо альтернатива  $a_i$  переважніше альтернативи  $a_j$ , а альтернатива  $a_j$  переважніше альтернативи  $a_k$ , то альтернатива  $a_i$  теж переважніше альтернативи  $a_k$ .

**Аксіома 4. Комутативність.** Перевага альтернативи  $a_i$  відносно альтернативи  $a_j$  не залежить від порядку, у якому вони розглядаються.

**Аксіома 5. Незалежність.** Якщо альтернатива  $a_i$  переважніше альтернативи  $a_j$  й, крім того, існує альтернатива  $a_k$ , що не оцінюється щодо альтернатив  $a_i$  та  $a_j$ , то суміш альтернатив  $a_i$  та  $a_k$  переважніше суміші альтернатив  $a_j$  та  $a_k$ . Під сумішшю альтернатив  $a_l$  та  $a_m$  розуміється альтернатива, що полягає в появі однієї з них з деякою ймовірністю.



Відповідно до теорії корисності при виконанні в задачі оцінки системи всіх п'яти аксіом існує функція корисності, однозначно зазначена на множині всіх альтернатив, вимірювана в шкалі інтервалів. Важливо підкреслити, що функція корисності характеризує лише відносну, а не абсолютну перевагу альтернатив.

Залежно від типу показників альтернатив функція корисності може бути або безперервною, або дискретною. Функцію корисності називають прямою, якщо чим більше значення показника альтернативи, тим він корисніше, і зворотною, якщо чим більше значення показника альтернативи, тим менш він корисний.

Процедура визначення функції корисності включає три основних етапи: виявлення показників альтернатив, визначення множини припустимих альтернатив та визначення показників корисності альтернатив.

Визначення корисності як міри оцінки тієї або іншої альтернативи представляє складну задачу, точні методи рішення якої поки не знайдені. Всі відомі способи визначення функції корисності носять наближений характер і будуються на основі аналізу впливу альтернативи на показники корисності системи на більш високому рівні ієрархії, експертних оцінок та апроксимації.


### **6.9.2 Оцінка систем на основі моделі ситуаційного керування**

Теорія ситуаційного керування є найбільш стрункою концепцією в області формалізації систем переваг. Система переваг формалізується у вигляді набору логічних правил у певній мові, по яких може бути здійснений вибір альтернатив. При цьому поняття векторного критерію замінюється на поняття вирішального правила.

Оцінка систем на основі векторної оптимізації та теорії корисності припускає, що множина альтернатив, а також закони розподілу ймовірностей на множині альтернатив (якщо оцінка систем проводиться в умовах ризику) задані. Тим самим задача оцінки систем зводиться до задачі формалізації системи переваг. Крім того, у згаданих вище підходах не передбачається наявність нечіткого середовища.

В основі методу ситуаційного керування лежать два головних припущення:

- всі відомості про систему, цілі та критерії її функціонування, множину можливих рішень та критерії їх вибору можуть бути повідомлені керуючій системі у вигляді набору фраз природної мови;



- модель керування принципово відкрита і процес її навчання або формування ніколи не завершується створенням остаточної формалізованої моделі.

Таким чином, метод ситуаційного керування – метод автоматизації рішення задач керування такими системами, для яких, з одного боку, неможлива або недоцільна формалізація критерію оцінки у вигляді систем математичних рівнянь, а з іншого боку – можливий опис критерію у вигляді правила прийняття рішень як сукупності фраз природної мови.

Рішення задач оцінки та керування ситуаційним методом припускає побудову ситуаційних моделей, що імітують процеси, які протікають в об'єкті керування та керуючій системі, на базі наступних основних принципів:

- створення моделей середовища, об'єкта керування та керуючої системи в пам'яті ЕОМ;
- побудова моделей об'єкта керування та керуючої системи, а також опис стану об'єкта;
- формування ієрархічної системи узагальнених описів стану об'єкта керування;
- класифікація станів для виводу можливих рішень;
- прогнозування наслідків прийнятих рішень;
- навчання та самонавчання.


*Семіотичною* будемо називати модель керування, що представлена за допомогою елементів мови, яка використана аналітиком при описі відповідного процесу керування, і відображає закономірності процесу керування.

Відмінності семіотичних моделей від формальних полягають у наступному:

- семіотичні моделі мають відсутнє у формальних моделях множину знаків, що володіють планами вираження (синтаксисом) і змістом (семантикою);
- семіотичні моделі (на відміну від формальних) можуть самостійно змінювати свій синтаксис і семантику;
- семіотичні моделі є відкритими, а не замкнутими, як формальні; відкритість обумовлюється можливістю зміни синтаксису або семантики системи ззовні.

Процеси, що протікають у семіотичних системах, у методі ситуаційного керування прийнято описувати за допомогою семантичних мереж.

Під *семантичною мережею* мається на увазі граф, вузли якого відповідають поняттям та об'єктам, а дуги – відносинам між об'єктами.



Множина правил описується мовою ситуаційного керування правилами підстановки виду  $H_1 \rightarrow H_2$ , де  $H_1, H_2$  – висловлення, що описують факти.

Основні етапи оцінки системи на основі ситуаційних моделей включають:

- одержання опису поточної ситуації, наявної на об'єкті керування, який аналізується;
- поповнення опису ситуації на рівні базових понять;
- класифікацію ситуації та виявлення класів можливих рішень по оцінці систем;
- вивід припустимих оцінок;
- прогнозування наслідків прийняття припустимих рішень як остаточні оцінки;
- ухвалення рішення по оцінці.

## **6.10 Висновки до теми**

У результаті вивчення теми було з'ясовано, що методи оцінювання та порівняння систем становлять основу процесу прийняття рішень у системному аналізі. Вони забезпечують можливість обґрунтовано визначати переваги різних варіантів систем, виявляти найефективніші альтернативи та прогнозувати наслідки їх реалізації.

Розглянуті методи - від якісних експертних до кількісних, заснованих на теорії корисності та ситуаційному керуванні - дозволяють комплексно підходити до оцінювання складних об'єктів, враховуючи як технічні, так і соціально-економічні фактори.

Таким чином, володіння методами оцінювання й порівняння систем є необхідною складовою підготовки аналітика, що приймає науково обґрунтовані рішення в умовах невизначеності та багатокритеріальності.



## ТЕМА 7. МЕТОДИ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

Системний аналіз - це міждисциплінарна галузь науки і практики, яка виникла у середині ХХ століття внаслідок потреби вирішувати складні проблеми в умовах зростаючої технологічної складності та обмеженості ресурсів. Цей підхід був розроблений у військовій сфері, а пізніше набув широкого застосування в економіці, техніці, управлінні та інших галузях. Головна мета системного аналізу - вивчення складних систем, оцінка їхніх властивостей, моделювання можливих сценаріїв розвитку та підтримка прийняття оптимальних рішень.

В основі системного аналізу лежить використання спеціальних методів і моделей, що дають змогу досліджувати поведінку систем та їхніх складових. Ці методи мають як аналітичний, так і графічний характер, забезпечуючи чіткість, структурованість та інтуїтивне розуміння. Їхнє використання є критично важливим для вирішення завдань у багатьох сферах.

Першими прикладами системного аналізу були моделі для оптимізації використання військових ресурсів під час Другої світової війни. Наприклад, дослідження операцій використовувалося для визначення найефективніших стратегій розташування радарів і підводних човнів. З часом ці підходи стали популярними в цивільному житті, коли постала потреба у вирішенні комплексних інженерних і управлінських завдань.


Ця лекція присвячена огляду трьох важливих методів, які широко застосовуються у задачах системного аналізу:

*Мережі Петрі* - створені німецьким математиком Карлом Адамом Петрі в 1962 році. Цей метод спочатку використовувався для моделювання паралельних обчислень, але згодом знайшов застосування у виробничих процесах, робототехніці, розробці програмного забезпечення та навіть у біології для моделювання метаболічних процесів.

*Таблиці рішень* - виникли в середині ХХ століття для формалізації логіки прийняття рішень. Цей метод дозволяє систематично описувати правила прийняття рішень у вигляді таблиць, що дуже корисно для розробки бізнес-процесів або алгоритмів у програмному забезпеченні.

*Дерева рішень* - метод, який став популярним із розвитком машинного навчання та аналізу великих даних. Його застосування охоплює класифікацію клієнтів, прогнозування продажів, оцінку ризиків у страхуванні тощо.

Завдяки історії розвитку цих методів можна побачити, як математичні моделі поступово інтегрувалися у повсякденне життя, забезпечуючи зручність і точність у прийнятті рішень. У цій лекції ми не



лише ознайомимося з теоретичними основами кожного з методів, але й розглянемо практичні приклади їх використання. Це дозволить краще зрозуміти, як обирати відповідний інструмент для конкретної задачі, і оцінити вплив прийнятих рішень на систему загалом.

Почнемо з вивчення мереж Петрі, які є одним із найстаріших і найпотужніших інструментів для моделювання динамічних систем.

## 7.1 Мережі Петрі

У світі, де складні системи дедалі більше інтегруються в різні аспекти людської діяльності, виникає потреба в ефективних методах їх моделювання, аналізу та оптимізації. Системи, що включають велику кількість взаємодіючих компонентів, наприклад, комп'ютерні мережі, виробничі лінії, транспортні системи чи бізнес-процеси, часто характеризуються високим ступенем паралелізму та складністю. Для аналізу таких систем одним із найбільш ефективних інструментів є мережі Петрі.

*Мережі Петрі* були розроблені Карлом Адамом Петрі у 1960-х роках як математична модель для аналізу розподілених систем. Вони поєднують графічний опис із формальною математичною основою, що робить їх корисними як для візуалізації системи, так і для строгого аналізу її поведінки. Завдяки універсальності та гнучкості, мережі Петрі застосовуються в різних галузях - від розробки програмного забезпечення до моделювання соціальних систем і навіть біологічних процесів.

Основна ідея мереж Петрі полягає у поданні системи як сукупності станів та подій, що змінюють ці стани. Вони дозволяють описувати як детерміновані, так і стохастичні процеси, а також виявляти критичні властивості системи, такі як досяжність станів, наявність тупикових ситуацій чи зациклення.

Ми розглянемо базову концепцію мереж Петрі, принципи їх функціонування, типові сценарії застосування та переваги, які вони надають при моделюванні складних систем.

*Мережа Петрі* – графічна модель системи з високим ступенем розпаралелення обчислень, яка використовується для аналізу певних її властивостей (чи досяжні деякі стани системи, шляхи їх досягнення).

Наприклад, моделювання роботи виробничого конвеєра. Уявіть, що на заводі працює конвеєр, де кілька машин одночасно виконують різні операції. За допомогою мереж Петрі можна змоделювати процес взаємодії між цими машинами, перевірити, чи є конфлікти доступу до ресурсів, і виявити можливі тупикові ситуації, коли одна машина чекає

завершення роботи іншої. Або, інший приклад. Управління дорожнім рухом. У транспортних системах мережі Петрі дозволяють моделювати роботу світлофорів і аналізувати потоки транспорту, щоб уникнути заторів.

Мережі Петрі мають зручну графічну форму уявлення як графа, та складається з множини вузлів (місць) - місця зображуються кружками, множини символів, переходів (прямокутники наприклад) та множини орієнтованих ребер (рис. 7.1). Кожен перехід зв'язується з відповідною множиною вихідних вузлів. Кожен перехід з'єднується з кожним з вхідних вузлів дугою, спрямованою від переходу до вузла. Також перехід може мати натуральне число, яке графічно зображується поруч із дугою та називається *кратністю дуги*. Дуги, що мають одиничну кратність, позначатимуться без приписування одиниць.  $p, r, q, s, t$  – вузли;  $B1, B2, B3, B4$  – переходи.

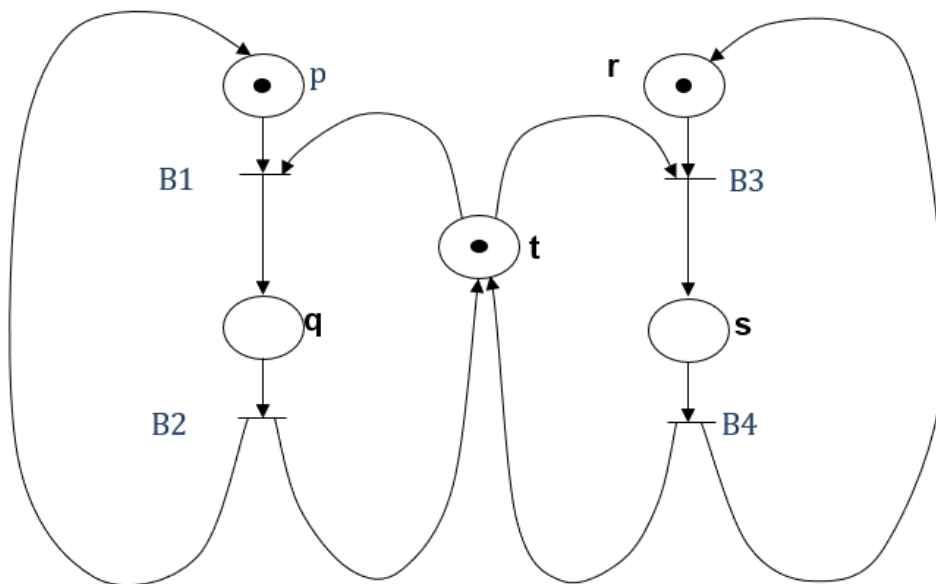



Рисунок 7.1 – Схема мережі Петрі

Стан системи представляється наявністю певних міток у вузлах, а конкретний стан відображається конфігурацією міток. Такий розподіл міток між вузлами називається *розміткою*.

Символи переходів показують можливі зміни стану системи. Перехід може спрацювати (відображаючи зміну стану) тільки тоді, коли кожний з його вхідних вузлів має щонайменше одну мітку.

Коли перехід спрацює, відбувається вилучення мітки з кожного його вхідного вузла та пересилання по одній мітці в кожний з його вихідних вузлів. Таким чином, комбінація вхідних і вихідних вузлів деякого переходу



відображає як умови, при яких може відбутися зміна стану, так і вплив цієї зміни на стан системи (поточну розмітку).

Спрацьовування переходу є миттєвою та неподільною подією, тому одночасне спрацьовування двох або більше переходів неможливо. Коли стан такий, що два або більш переходи претендують на спрацьовування, кожний з них повинен розглядатися окремо.

Починаючи з вихідної розмітки, що відповідає початковому стану системи, генеруються нові стани системи, що характеризуються своїми розмітками.

З використанням мереж Петрі можуть бути легко виявлені тупикові стани системи та шляхи їх досягнення, непродуктивні зациклення та завжди можна встановити, чи відповідає поведінка системи очікуваному.

Хоча процедура генерації досяжної розмітки досить тривіальна, спроби вичерпного аналізу поведінки системи таким способом виявляються марними внаслідок великої кількості можливих розміток, яка може бути нескінченною. Таким чином, головна задача, тобто визначення досяжності деякої розмітки з заданого вихідного стану, у загальному випадку виявляються нерозв'язною.

Представлену на рисунку 7.1 мережу можна розглядати як модель системи, у якій два процеси спільно використовують загальний поділюваний ресурс. Стан готовності ресурсу до використання представляється наявністю мітки у вузлі  $t$ . Можливі (релевантні) стани одного процесу, що володіє або не володіє ресурсом, представляються міткою у вузлах  $p$  та  $q$  відповідно. Аналогічно мітки у вузлах  $r$  та  $s$  представляють релевантні стани іншого процесу.

У вихідному маркуванні (рис. 7.1) можуть спрацьовувати переходи  $B1$  та  $B3$ , тому що мітки перебувають у вузлах  $p$ ,  $t$  та  $r$ . Припустимо, що спрацьовує перехід  $B1$ . Тоді вилучаються мітки з вузлів  $p$  та  $t$  і пересилається єдина мітка у вузол  $q$ . Тепер може спрацьовувати тільки перехід  $B2$  (перехід  $B3$  спрацьовувати не може, тому що вузол  $t$  не має мітки).

Коли перехід  $B2$  спрацьовує, мітка вилучається з вузла  $q$  і нові мітки містяться у вузлах  $p$  та  $t$ . У результаті відновлюється вихідна розмітка.

## 7.2 Таблиці рішень

*Таблиця рішень* – матриця, що відображає множину вхідних умов і множину дій. Таблиці рішень – зручний засіб, що дозволяє цілеспрямовано розробляти раціональні, а в ряді випадків і оптимальні алгоритми, що реалізують складні логічні ситуації.

Таблиця рішень складається з двох частин. Верхня частина містить визначення умов. Умова розглядається як частина «ЯКЩО» оператора «ЯКЩО-ТО» і вимагає відповіді «Так – Ні» (Т, Н або Y, N). Іноді може бути й кілька значень (обмежена множина значень відповіді), наприклад, довжина рядка більш, менш або дорівнює заданому граничному значенню.

Нижня частина таблиці рішень використовується для визначення дій (дія розглядається як частина «ТО» в операторі «ЯКЩО-ТО»).

Таблиці складаються з умов, варіантів рішень та дій, тобто з основних елементів всіх програм, тому можуть бути використані як гнучкий інструмент для опису не тільки даних, але й значної частини логіки будь-якої програми.

Виділяють два види таблиць:

- з обмеженим входом (таблиця 7.1) – входи мають два значення: Y (або Так, 1, Істина), N (чи Ні, 0, Неправда);
- з розширеним входом (таблиця 7.2) – входи мають більше двох варіантів значень (більше, менше, дорівнює).

Списки логічних можливостей звичайно нумерують та у таблиці використовують їх номери (1, 2, 3).

Розглянемо приклад таблиці рішень з обмеженим входом для трьох умов: C1-C3. Загальне число варіантів у таблиці рішень з обмеженим входом дорівнює  $2^n$ , де n – число умов (для розглянутого прикладу  $2^3=8$ ).

Для умови C1 можливі три рішення (1, 2, 3); для умови C2 – два рішення (1, 2); для умови C3 – чотири рішення (1, 2, 3, 4). Усього можливі 24 правила рішення ( $3*2*4 = 24$ ), тобто при підрахунку загальної кількості можливих варіантів рішень кількості можливих рішень для кожної з умов перемножуються.

Таблиця 7.1 – Приклад таблиці рішень з обмеженим входом

Умови	Варіанти рішень							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C1	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y
C2	N	N	Y	Y	N	N	Y	Y
C3	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y

Таблиця 7.2 – Приклад таблиці рішень з розширеним входом

Умови	Варіанти рішень											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
С1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
С2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1
С3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Умови	Варіанти рішень											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
С1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
С2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
С3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4

Розглянемо алгоритм побудови таблиць рішень на прикладі рішення завдання вибору заданої множини символів з вхідного потоку. Символи містяться в масив символів, що є буфером певного розміру.

Перелічимо правила обробки вхідного потоку символів:

- якщо черговий символ є керуючим (умова С1), то необхідно подати звуковий сигнал (дія Д1) та повернути код помилки (дія Д2);
- якщо буфер рядка, що формується, заповнений (умова С2), то необхідно подати звуковий сигнал (Д1) та повернути код помилки (Д2);
- якщо черговий символ не перебуває у заданому діапазоні (умова С3), то подати звуковий сигнал (Д1) та повернути код помилки (Д2);
- інакше помістити символ у буфер (Д3), збільшити значення лічильника обраних символів та повернути нове значення лічильника (Д4).

Для розглянутого прикладу таблиця рішень прийме вид, наведений у таблиці 7.3.

Таблиця 4.3 – Таблиця рішень для розглянутого прикладу

Умови	1	2	3	4	5	6	7	8	
C1 <i>isctrl(c)</i>	T	T	T	T	H	H	H	H	Варіанти умов
C2 <i>i &gt; max_range (c)</i>	T	T	H	H	T	T	H	H	
C3 <i>out_of_range (c)</i>	T	H	T	H	T	H	T	H	
Дії									
Д1 <i>beep ( )</i>	1	1	1	1	1	1	1	–	Порядок дій за даних умов
Д2 <i>return (ERROR)</i>	2	2	2	2	2	2	2	–	
Д3 <i>putchar (c)</i>	–	–	–	–	–	–	–	1	
Д4 <i>return (++ i)</i>	–	–	–	–	–	–	–	2	

Зауважимо, що якщо виконується C1, тоді немає необхідності в перевірці умов C2 і C3. Комбінацію логічних можливостей 1, 2, 3 та 4 замінимо на (T, –, –), де (–) – це будь-яка з альтернатив T и H. Комбінації логічних можливостей 5 та 6 можуть бути замінені узагальнюючою комбінацією (H, T, –). Комбінації логічних можливостей 7 та 8 залишаються без змін. Тоді результуюча таблиця рішень прийме вид, наведений у таблиці 7.4.

На основі таблиці рішень легко здійснити автоматичну генерацію коду.

Наприклад, для наведеної таблиці рішень запишемо код мовою C:

```

if (isctrl (c)) {beep ( ); return (ERROR);}
else {
    if (i(max_length) {beep ( ); return (ERROR);}
    else {
        if(out_of_range (c)) {beep( ); return (ERROR);}

```

```

else { putchar (c); return (++ i );}
}}

```

Таблиця 7.4 – Спрощена таблиця рішень

Умови	1	2	3	4
C1 <i>isctrl(c)</i>	T	H	H	H
C2 <i>i&gt;max_range(c)</i>	–	T	H	H
C3 <i>out_of_range(c)</i>	–	–	T	H
Дії				
D1 <i>beep()</i>	1	1	1	–
D2 <i>return(ERROR)</i>	2	2	2	–
D3 <i>putchar(c)</i>	–	–	–	1
D4 <i>return(++i)</i>	–	–	–	2

Сформулюємо рекомендації з побудови таблиць рішень:

- 1 Ідентифікувати всі умови (або змінні) у специфікації. Ідентифікувати всі значення, які може мати змінна.
- 2 Обчислити число комбінацій умов. Якщо всі умови бінарні (Т, Н), то існує  $2^N$  комбінацій для N змінних.
- 3 Ідентифікувати в специфікації кожну з можливих дій, які повинні виконуватися.
- 4 Побудувати та занести в таблицю всі комбінації умов і дії, які при цьому виконуються.
- 5 Редукувати комбінації умов та дій (знизити кількість стовпців).
- 6 Перевірити кожну комбінацію умов та ідентифікувати відповідні дії, виконувани при цих умовах.
- 7 Виділити комбінації умов, для яких специфікація не вказує список виконуваних дій. Доповнити специфікацію та таблицю.
- 8 Оформити остаточну таблицю.

### 7.3 Древа рішень

Стрімкий розвиток інформаційних технологій, зокрема, прогрес у методах збору, зберігання та обробки даних, дозволив багатьом організаціям збирати величезні масиви даних, які необхідно аналізувати. Обсяги цих даних настільки великі, що можливостей експертів уже не вистачає, що породило попит на методи автоматичного дослідження (аналізу) даних. Древа рішень – один з таких методів автоматичного аналізу даних.

Уведемо основні поняття з теорії дерев рішень (табл. 7.5).

*Древа рішень* – це спосіб подання правил в ієрархічній послідовній структурі, де кожному об'єкту відповідає єдиний вузол, що дає рішення (рис. 7.2). Під правилом розуміється логічна конструкція, представлена у вигляді «якщо ..., то ...».

Таблиця 7.5 – Основні поняття теорії дерев рішень

Назва	Опис
Об'єкт	Приклад, шаблон, спостереження
Атрибут	Ознака, незалежна змінна, властивість
Мітка класу	Залежна змінна, цільова змінна, ознака, що визначає клас об'єкта
Вузол	Внутрішній вузол дерева, вузол перевірки
Лист	Кінцевий вузол дерева, вузол рішення
Перевірка	Умова у вузлі

До достоїнств використання дерев рішень відносять:

- швидкий процес навчання;
- генерація правил в областях, де експертові важко формалізувати свої знання;
- добування правил на природній мові;
- інтуїтивно зрозуміла класифікаційна модель;
- висока точність прогнозу, порівнянна з іншими методами (статистика, нейронні мережі);
- побудова непараметричних моделей.

У силу цих та багатьох інших причин методологія дерев рішень є важливим інструментом у роботі кожного фахівця, що займається аналізом даних.

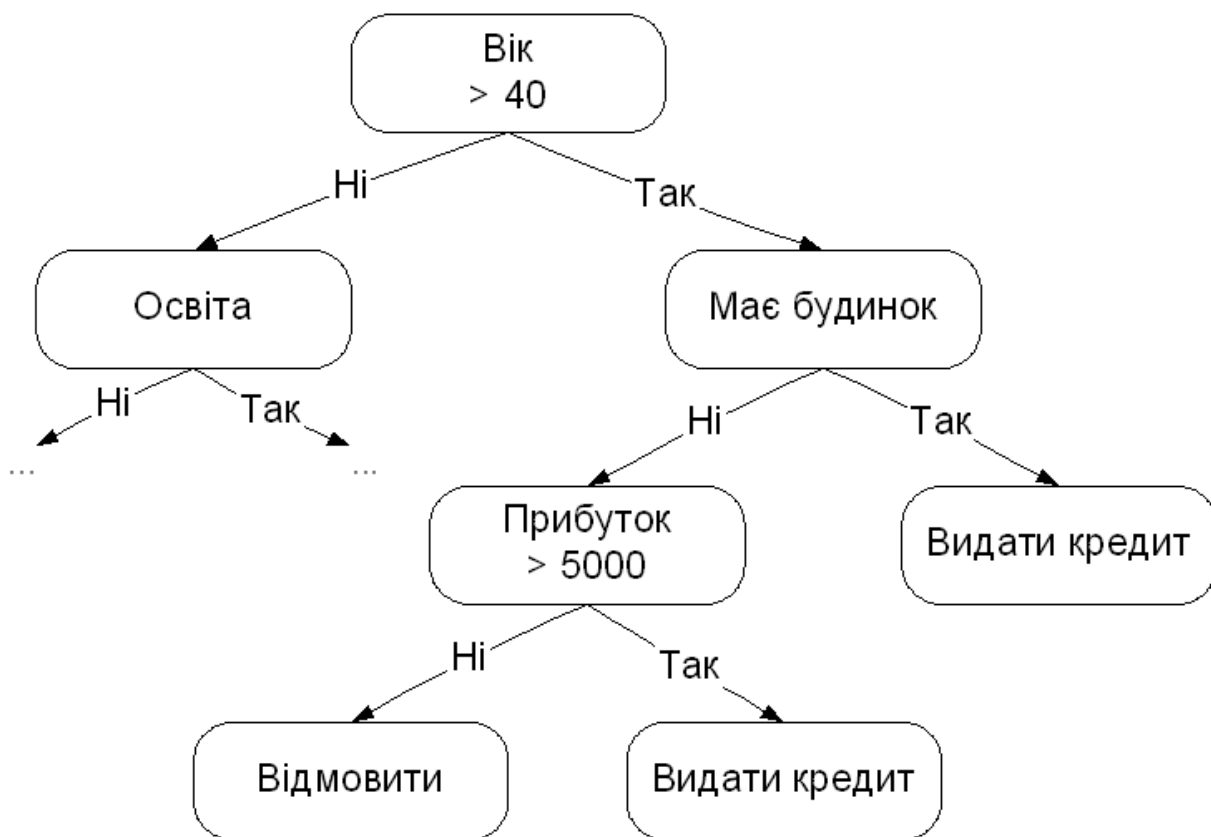



Рисунок 7.2 – Приклад дерева рішень

Дерева рішень використовуються в системах підтримки прийняття рішень та інтелектуального аналізу даних. До складу багатьох пакетів, призначених для інтелектуального аналізу даних, уже включені методи побудови дерев рішень.

Область застосування дерев рішень у цей час широка, але всі задачі, розв'язувані з їх використанням, можуть бути об'єднані в наступні три класи:

- представлення даних: дерева рішень дозволяють зберігати інформацію про дані в компактній формі;
- класифікація: дерева рішень дозволяють вирішувати задачі віднесення об'єктів до одного з заздалегідь відомих класів; при цьому цільова змінна повинна мати дискретні значення;
- регресія: якщо цільова змінна має безперервні значення, дерева рішень дозволяють установити залежність цільової змінної від незалежних (вхідних) змінних.



Нехай задана деяка навчальна множина  $T$ , що містить об'єкти, кожний з яких характеризується  $m$  атрибутами, причому один з цих атрибутів указує на приналежність об'єкта до певного класу.

Нехай через  $C_1, C_2, \dots, C_k$  позначено класи об'єктів. Тоді існують три ситуації:

1 Множина  $T$  містить один або більше об'єктів, що відносяться до одного класу  $C_k$ . Тоді дерево рішень для  $T$  – це лист, що визначає клас  $C_k$ .

2 Множина  $T$  не містить жодного об'єкта, тобто є порожньою множиною. Тоді дерево рішень для  $T$  – це лист, а клас, асоційований з листом, вибирається з іншої множини, відмінної від  $T$ .

3 Множина  $T$  містить об'єкти, що відносяться до різних класів. У цьому випадку варто розбити множину  $T$  на деякі підмножини. Для цього вибирається одна з ознак, що має два та більше відмінних друг від друга значень:  $O_1, O_2, \dots, O_n$ . Множина  $T$  розбивається на підмножини  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , де кожна підмножина  $T_i$  містить всі об'єкти, що мають значення  $O_i$  для обраної ознаки. Ця процедура буде рекурсивно тривати доти, поки кінцева множина не буде складатися з об'єктів, що відносяться до того самого класу.

Вищеописана процедура лежить в основі багатьох сучасних алгоритмів побудови дерев рішень (цей метод відомий за назвою поділу та захвату). Очевидно, що при використанні даної методики побудова дерева рішень буде відбуватися зверху вниз.

На сьогоднішній день існує значне число алгоритмів, що реалізують дерева рішень. Але найбільше поширення та популярність одержали наступні два:


- CART (Classification and Regression Tree) – це алгоритм побудови бінарного дерева рішень. Кожен вузол дерева при розбивці має тільки двох нащадків. Як видно з назви алгоритму, він вирішує задачі класифікації та регресії;

- C4.5 – алгоритм побудови дерева рішень, для якого кількість нащадків у вузла не обмежено. Алгоритм не працює з безперервним цільовим полем, тому вирішує тільки задачі класифікації.

При побудові дерев рішень особлива увага приділяється наступним питанням:

- вибору атрибута, по якому піде розбивка;
- визначенню моменту зупинки навчання;
- принципам відсікання гілок.

*Вибір атрибута.* Для побудови дерева на кожному внутрішньому вузлі необхідно знайти таку умову, яка б розбивала множину, асоційовану з цим вузлом, на підмножини. У якості такої перевірки повинен бути обраний один з атрибутів. Загальне правило для вибору атрибута можна



сформулювати у такий спосіб: обраний атрибут повинен розбити множину так, щоб одержані в підсумку підмножини склалися з об'єктів, що належать до одного класу (або були максимально наближені до цього), тобто кількість об'єктів з інших класів (домішок) у кожній з цих множин було мінімальним.

Розглянемо метод побудови дерев рішень, що використовується в одному з кращих алгоритмів побудови дерев рішень C4.5.

Перш ніж приступити до опису алгоритму побудови дерева рішень, необхідно визначити обов'язкові вимоги до структури даних та безпосередньо до самих даних, при виконанні яких алгоритм C4.5 буде працездатний:

- опис атрибутів. Дані, необхідні для роботи алгоритму, повинні бути представлені у вигляді плоскої таблиці. Вся інформація про об'єкти з предметної області повинна описуватися у вигляді кінцевого набору атрибутів. Кожен атрибут повинен мати дискретне або числове значення. Самі атрибути не повинні мінятися від об'єкта до об'єкта, і кількість атрибутів повинна бути фіксованою для всіх об'єктів;

- визначені класи. Кожен об'єкт повинен бути асоційований з конкретним класом, тобто один з атрибутів повинен бути обраний у якості мітки класу;

- дискретні класи. Класи повинні бути дискретними, тобто мати кінцеве число значень. Кожен об'єкт повинен однозначно відноситися до конкретного класу. Випадки, коли об'єкти належать до класу з імовірнісними оцінками, виключаються. Кількість класів повинна бути значно меншою кількості об'єктів.

Завдання побудови дерева рішень полягає в створенні ієрархічної класифікаційної моделі у вигляді дерева з множини об'єктів  $T$ . Процес побудови дерева буде відбуватися зверху вниз. Спочатку створюється корінь дерева, потім нащадки кореня тощо. На першому кроці є порожнє дерево (є тільки корінь) та вихідна множина  $T$  (асоційована з коренем). Потрібно розбити вихідну множину на підмножини. Це можна зробити, вибравши один з атрибутів в якості перевірки. Тоді в результаті розбивки отримують  $n$  (за числом значень атрибута) підмножин  $i$ , відповідно, створюються  $n$  нащадків кореня, кожному з яких поставлена у відповідність своя підмножина, отримана при розбивці множини  $T$ . Потім ця процедура рекурсивно застосовується до всіх підмножин.

Розглянемо докладніше критерій вибору атрибута, по якому повинне піти розгалуження. Очевидно, що є  $m$  можливих варіантів, з яких необхідно вибрати самий підходящий. Будемо виходити з припущення, що кожен з атрибутів можна використати необмежену кількість разів при побудові дерева.

Нехай ми маємо перевірку  $X$  (у якості перевірки може бути обраний будь-який атрибут), що приймає  $n$  значень  $A_1, A_2, \dots, A_n$ . Тоді розбивка множини  $T$  по перевірці  $X$  дасть підмножини  $T_1, T_2, \dots, T_n$  при  $X$ , рівному відповідно  $A_1, A_2, \dots, A_n$ . Єдина доступна нам інформація – це яким чином класи розподілені в множині  $T$  та його підмножинах, які одержані при розбивці по  $X$ . Саме цим необхідно скористатися при визначенні критерію.

Нехай  $fred(C_j, S)$  – кількість об'єктів з деякої множини  $S$ , що відносяться до класу  $C_j$ . Тоді ймовірність того, що випадково обраний об'єкт з множини  $S$  буде належати до класу  $C_j$ , дорівнює:

$$P = \frac{fred(C_j, S)}{|S|}. \quad (7.1)$$

Відповідно до теорії інформації, кількість інформації, що міститься в повідомленні, залежить від її ймовірності, як  $\log_2\left(\frac{1}{P}\right)$ .

Тоді вираження

$$Info(T) = - \sum \frac{fred(C_j, S)}{|T|} \log_2\left(\frac{fred(C_j, S)}{|T|}\right) \quad (7.1)$$

дає оцінку середньої кількості інформації, необхідної для визначення класу об'єктів з множини  $T$ . У термінології теорії інформації наведене вираження називається *ентропією множини  $T$* .


Ту ж оцінку, але тільки вже після розбивки множини  $T$  по атрибуту  $X$ , дає вираження

$$Info_X(T) = \sum_{i=1}^n \frac{|T_i|}{|T|} Info(T_i). \quad (7.3)$$

Тоді критерієм для вибору атрибута буде наступна формула:

$$Grain(X) = Info(T) - Info_X(T). \quad (7.4)$$

Критерій (7.4) визначається для всіх атрибутів. Потім вибирається атрибут, який забезпечує максимум даного вираження. Цей атрибут буде перевіркою в поточному вузлі дерева, а потім по цьому атрибуту робиться



подальша побудова дерева, тобто у вузлі буде перевірятися значення по цьому атрибуті, та подальший рух по дереву буде проводитися залежно від отриманої відповіді.

Таке ж міркування можна застосувати до отриманих підмножин  $T_1, T_2, \dots, T_n$  та продовжити рекурсивно процес побудови дерева, доти, поки у вузлі не виявляться об'єкти з одного класу.


Одне важливе зауваження: якщо в процесі роботи алгоритму отриманий вузол, асоційований з порожньою множиною (тобто жоден об'єкт не потрапив у даний вузол), тоді він позначається як лист, і як рішення листа вибирається клас, який найбільш часто зустрічається у безпосереднього предка даного листа.

Тут варто пояснити, чому критерій (7.4) повинен максимізуватися. З властивостей ентропії відомо, що максимально можливе значення ентропії досягається в тому випадку, коли всі повідомлення рівно імовірні. У розглянутому випадку, ентропія досягає свого максимуму, коли частота появи класів у прикладах множини  $T$  рівно імовірна. Нам же необхідно вибрати такий атрибут, щоб при розбивці по ньому один з класів мав найбільшу ймовірність появи. Це можливо в тому випадку, коли ентропія буде мати мінімальне значення і, відповідно, критерій (7.4) досягне свого максимуму.

Критерій (7.4) має один недолік – він частіше вибирає атрибути, які мають багато значень. Розглянемо задачу медичної діагностики, де один з атрибутів ідентифікує особистість пацієнта. Оскільки кожне значення цього атрибута унікальне, то при розбивці множини об'єктів по цьому атрибуті виходять підмножини, що містять тільки по одному об'єкту. Тому що всі ці множини «однооб'єктні», тоді й приклад відноситься, відповідно, до одного єдиного класу, тоді  $Info_X(T) = 0$ . Виходить, критерій (7.4) приймає своє максимальне значення, і безсумнівно, що саме цей атрибут буде обраний алгоритмом. Однак якщо розглянути проблему з погляду передбачуваних здатностей побудованої моделі, то стає очевидною вся її марність.

Проблема вирішується введенням нормалізації. Нехай суть інформації повідомлення, що відноситься до об'єкта, указує не на клас, до якого належить об'єкт, а на вихід. Тоді, за аналогією з визначенням  $Info(T)$ , маємо:

$$Split\ Info_X(X) = - \sum_{j=1}^n \frac{T_j}{T} \log_2 \left( \frac{T_j}{T} \right). \quad (7.5)$$



Вираження (7.5) оцінює потенційну інформацію, яку буде одержано при розбивці множини  $T$  на  $n$  підмножин.

Розглянемо наступне вираження:

$$Gain\ Ratio(X) = \frac{gain(X)}{Split\ Info(X)}. \quad (7.6)$$

Нехай вираження (7.6) є критерієм вибору атрибута. Очевидно, що атрибут, який ідентифікує пацієнта, не буде високо оцінений критерієм (7.6). Нехай є  $k$  класів, тоді чисельник вираження (7.6) максимально буде дорівнювати  $\log_2(k)$ . Нехай  $n$  – кількість об'єктів у навчальній вибірці та одночасно кількість значень атрибута, тоді знаменник максимально дорівнює  $\log_2(n)$ . Якщо припустити, що кількість об'єктів свідомо більше кількості класів, то знаменник росте швидше, ніж чисельник, і, відповідно, вираження буде мати невелике значення. Таким чином, ми можемо замінити критерій (7.4) на новий критерій (7.6).

Незважаючи на те, що критерій вибору атрибута був поліпшений, алгоритм може створювати вузли та листи, що містять незначну кількість об'єктів. Щоб уникнути цього, варто скористатися евристичним правилом: при розбивці множини  $T$  принаймні дві підмножини повинні мати не менше заданої мінімальної кількості об'єктів  $k$  ( $k > 1$ ); звичайно вона дорівнює 2. У випадку невиконання цього правила, подальша розбивка цієї множини припиняється, і відповідний вузол відзначається як лист. Імовірно, що при такому обмеженні може виникнути ситуація, коли об'єкти, асоційовані з вузлом, відносяться до різних класів. Як рішення листа вибирається клас, що найбільш часто зустрічається у вузлі. Якщо ж об'єктів рівна кількість з всіх класів, то рішення дає клас, що найбільш часто зустрічається у безпосереднього предка даного листа.

Розглянутий алгоритм побудови дерев рішень припускає, що для атрибута, обраного як перевірка, існують всі значення, тобто для будь-якого об'єкта з навчальної вибірки існує значення за цим атрибутом.

Поки обробляються синтетичні дані, особливих проблем не виникає: відсутні дані можна згенерувати. Але реальні дані далекі від ідеальних: часто зустрічаються пропущені, суперечні та аномальні дані.

Зупинимось на проблемі пропущених даних. Перше рішення, що лежить на поверхні, – це не враховувати об'єкти з пропущеними значеннями. Варто підкреслити, що вкрай небажано виключати з розгляду весь об'єкт тільки тому, що для одного з атрибутів пропущене значення, оскільки в такому випадку виникають втрати корисної інформації. Тому необхідно виробити процедуру роботи з пропущеними даними.

Нехай  $T$  – множина навчальних об'єктів та  $X$  – перевірка за деяким атрибутом  $A$ . Позначимо через  $U$  кількість невизначених значень атрибута  $A$ . Змінимо формули (7.2) і (7.3) таким чином, щоб ураховувати тільки ті об'єкти, у яких існують значення по атрибуті  $A$ :

$$Info_X(T) = - \sum_{j=1}^k \frac{fred(C_j, S)}{|T| - U} \log_2 \left( \frac{fred(C_j, S)}{|T| - U} \right). \quad (7.7)$$

$$Info_X(T) = \sum_{i=1}^n \frac{|T_i|}{|T| - U} Info(T_i). \quad (7.8)$$

У цьому випадку при підрахунку значень  $fred(C_j, S)$  ураховуються тільки об'єкти з існуючими значеннями атрибута  $A$ .

Тоді критерій (4.4) можна переписати у вигляді


$$Grain(X) = \frac{|T|}{|T| - U} (Info(T) - Info_X(T)). \quad (7.9)$$

Подібним чином змінюється і критерій (7.6). Якщо перевірка має  $n$  вихідних значень, то критерій (7.6) вважається як у випадку, коли вихідна множина розділена на  $n + 1$  підмножин.

При аналізі числових атрибутів варто вибрати якийсь поріг, з яким повинні рівнятися всі значення атрибута. Нехай числовий атрибут має кінцеве число значень. Позначимо їх  $v_1, v_2, \dots, v_n$ . Необхідно попередньо відсортувати всі значення. Тоді будь-яке значення, що лежить між  $v_i$  та  $v_{i+1}$ , ділить всі об'єкти на дві множини: ті, які лежать ліворуч від цього значення,  $(v_1, v_2, \dots, v_i)$ , і ті, що праворуч,  $(v_{i+1}, v_{i+2}, \dots, v_n)$ . Як поріг можна вибрати середнє між значеннями  $v_i$  та  $v_{i+1}$ :

$$TH_i = \frac{v_i + v_{i+1}}{2} \quad (7.10)$$

Таким чином, завдання знаходження порога істотно спрощується, тоді зводиться до розгляду всього  $n - 1$  потенційних граничних значень  $TH_1, TH_2, \dots, TH_{n-1}$ . Формули (7.1) - (7.4) послідовно застосовуються до всіх потенційних граничних значень і серед них вибирається те, що дає



максимальне значення за критерієм (7.4). Слід зазначити, що всі числові тести є бінарними, тобто ділять вузол дерева на дві гілки.

У результаті застосування такого алгоритму будується дерево рішень, яке можна використати для розпізнавання нового об'єкта  $Y$ . При цьому обхід дерева рішень починається з кореня дерева. На кожному внутрішньому вузлі перевіряється значення об'єкта  $Y$  по атрибуту, що відповідає перевірці в даному вузлі, та, залежно від отриманої відповіді, перебуває розгалуження, що визначає рух по дузі дерева до вузла, що перебуває на рівень нижче, і так далі. Обхід дерева закінчується, як тільки зустрінеться вузол рішення, що і дає назву класу об'єкта  $Y$ .

Недоліком наведеного алгоритму є можливість одержання гіллястих дерев у тих випадках, коли об'єкти визначаються більшою кількістю атрибутів. Цей недолік можна усунути, застосувавши методику відсікання гілок.

#### *Правило зупинки.*

- На додаток до основного методу побудови дерев рішень були запропоновані наступні правила:

- використання статистичних методів для оцінки доцільності подальшої розбивки, так звана рання зупинка, приваблива в плані економії часу навчання, але тут доречно зробити одне важливе застереження: цей підхід будує менш точні класифікаційні моделі, і тому використання ранньої зупинки вкрай небажано;


- обмежити глибину дерева. Зупинити подальшу побудову, якщо розбивка веде до дерева з глибиною, що перевищує задане значення;

- розбивка повинна бути нетривіальною, тобто вузли, що вийшли в результаті, повинні містити не менш заданої кількості об'єктів.

Цей список евристичних правил можна продовжити, але на сьогоднішній день не існує такого, яке б мало більшу практичну цінність. До цього питання варто підходити обережно, тому що багато з них застосовуються в якихось окремих випадках.

#### *Правило відсікання.*

Дуже часто алгоритми побудови дерев рішень дають складні дерева, які переповнені даними, мають багато вузлів та гілок. Такі гіллясті дерева дуже важко зрозуміти. До того ж гіллясте дерево, що має багато вузлів, розбиває навчальну множину на все більшу кількість підмножин, що складаються з меншої кількості об'єктів. Цінність логічного правила, справедливого для 2-3 об'єктів, вкрай низка, і з метою аналізу даних таке правило практично непридатне. Набагато переважніше мати дерево, що складається з малої кількості вузлів, яким би відповідала велика кількість об'єктів з навчальної вибірки. Для рішення вищеописаної проблеми часто застосовується так зване відсікання гілок.



Нехай під точністю розпізнавання дерева рішень розуміється відношення правильно класифікованих об'єктів при навчанні до загальної кількості об'єктів з навчальної множини, а під помилкою – кількість неправильно класифікованих. Припустимо, що відомий спосіб оцінки помилки дерева, гілок та листів. Тоді можливо використати наступне просте правило:

- побудувати дерево;
- відітнути або замінити піддеревом ті гілки, які не приведуть до зростання помилки.

У відмінності від процесу побудови, відсікання гілок відбувається знизу нагору, рухаючись з листів дерева, відзначаючи вузли як листи, або замінюючи їх піддеревом. Хоча відсікання не є панацеєю, але в більшості практичних задач дає гарні результати, що дозволяють говорити про правомірність використання подібної методики.

#### **7.4 Висновки до теми**

У процесі вивчення теми розглянуто основні методи, які застосовуються для вирішення задач системного аналізу, зокрема мережі Петрі, таблиці рішень та дерева рішень. Кожен із цих методів має свої переваги та сферу застосування - від моделювання динамічних і паралельних процесів до формалізації логіки прийняття рішень і побудови класифікаційних моделей.


Мережі Петрі забезпечують аналітичне й графічне подання поведінки складних систем, таблиці рішень дозволяють формалізувати алгоритми прийняття рішень, а дерева рішень - виявляти закономірності та залежності в даних, створюючи зрозумілі моделі для підтримки рішень.

Застосування цих методів у комплексі дає змогу підвищити ефективність аналізу, оптимізувати процеси та приймати обґрунтовані рішення у технічних, економічних і соціальних системах.

Таким чином, методи вирішення задач системного аналізу є важливими інструментами сучасного аналітика, що забезпечують науковий підхід до дослідження, моделювання й оптимізації складних систем різної природи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tilley S., Rosenblatt H. J. Systems Analysis and Design. Cengage Learning, 2021. 752 с.
2. Satzinger J. W., Jackson R. B., Burd S. D. Systems Analysis and Design in a Changing World. Cengage Learning, 2020. 720 с.
3. Valacich J. S., George J. F. Modern Systems Analysis and Design. Pearson Education, 2020. 552 с.
4. Dennis A., Wixom B. H., Tegarden D. Systems Analysis and Design: An Object-Oriented Approach with UML. Wiley, 2021. 544 с.
5. Valacich J. S., George J. F., Hoffer J. A. Essentials of Systems Analysis and Design. Pearson Education, 2021. 451 с.
6. Kendall K. E., Kendall J. E. Systems Analysis and Design. Pearson Education, 2021. 752 с.
7. Blokdyk G. System Analyst A Complete Guide - 2020. 5STARCOoks, 2021. 306 p.
8. Панкратова Н. Д. Системний аналіз: теорія та застосування. Київ : Наукова думка, 2018. 450 с.
9. Мащенко С. О., Мокін В. Б., Гарт Л. Л., Дорофєєв Ю. І., Литвин В. В. Системний аналіз та проектування інформаційних систем. Видавництво Наука, 2021. 500 с.
10. Верес О. М., Литвин В. В. Системний аналіз та проектування. Видавництво Техніка, 2021. 480 с.
11. Глазунова О. Г., Корольчук В. І. Системний аналіз: методи та інструменти. Видавництво Техніка, 2021. 470 с.
12. Прикладні аспекти системного аналізу в телекомунікаціях та радіотехніці. Методичні рекомендації до виконання практичних занять : навч. посіб. / уклад.: С. О. Кравчук, О. І. Лисенко, В. С. Явіся, В. І. Новіков. Київ : НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 24 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41977>.
13. Балтовський О. А., Ісмаїлов К. Ю., Сіфоров О. І., Форос Г. В., Заєць О. М. Теорія систем і системний аналіз : навч. посіб. / за заг. ред. О. А. Балтовського. Одеса : ОДУВС, 2021. 156 с. URL: <http://dspace.oduvs.edu.ua/handle/123456789/1744>.
14. Міца О. В., Лавер В. О. Системний аналіз : навчально-методичний посібник. Ужгород : ПП «АУТДОР-ШАРК», 2021. 63 с. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/35668>.
15. Системний аналіз : навчальний посібник для здобувачів спеціальності 122 – Комп'ютерні науки / уклад.: В. М. Тонконогий, В. О. Вайсман, Л. В. Бовнегра, К. Г. Кіркопуло. Одеса : Нац. ун-т «Одеська політехніка», 2022. 84 с. URL: <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/12878>
16. Теорія систем і системний аналіз : конспект лекцій / уклад. С. В. Соколов. Суми : Сумський державний університет, 2020. 171 с.

- 
17. Негрей М., Тужик К. Теорія прийняття рішень : навчальний посібник. Київ : Центр навчальної літератури. 2019. 272 с. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/904bacf2-81e7-4489-8745-a3ec341d8cd7/content>
  18. Прокопенко Т. О. Теорія систем і системний аналіз : навч. посібник. Черкаси : ЧДТУ, 2019. 139 с. URL: <https://surl.li/exbcgu>
  19. Заполовський М. Й., Кучук Н. Г., Мезенцев М. В. Теорія систем та системного аналізу: навч. посібник. Харків : Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т", 2024. 235 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79608>
  20. Методи моделювання складних систем і процесів / Є. А. Настенко, В. А. Павлов, О. К. Носовець, Г. А. Корнієнко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 144 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50988>
  21. Мілявський Ю. Л. Когнітивне моделювання складних систем. Проектування та аналіз когнітивних моделей. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 39 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74022>
  22. Добротвор І. Г., Саченко А. О., Буяк Л. М. Системний аналіз. Тернопіль : ТНЕУ, 2019. 170 с. URL: <https://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/33682>



*Навчально-методичне видання*

**Гетьман Ірина Анатоліївна  
Міхєєнко Денис Юрійович  
Держевецька Марина Анатоліївна**

## **СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ**

### **Конспект лекції**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції