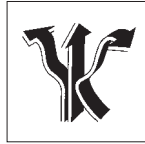


МІЖРЕГІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ



МАУП

Н. Б. Чорней, Р. К. Чорней

ТЕОРІЯ СИСТЕМ І СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів*

Київ 2005

ББК 14я73
Ч-75

Рецензенти: *О. Ф. Волошин*, д-р техн. наук, проф.
П. С. Кнопов, д-р фіз.-мат. наук, проф.

*Схвалено Вченою радою Міжрегіональної Академії
управління персоналом (протокол № 3 від 25.03.03)*

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(лист № 14/18.2-2699 від 20.12.04)*

Чорней Н. Б.

Ч-75 Теорія систем і системний аналіз: Навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Н. Б. Чорней, Р. К. Чорней. — К.: МАУП, 2005. — 256 с.: іл. — Бібліогр.: с. 224–236.

ISBN 966-608-486-4

У навчальному посібнику викладено відповідні теоретичні положення та основні напрями розвитку сучасної теорії систем і системного аналізу. Велику увагу приділено наочному поданню матеріалу. Розглянуто основні принципи системного аналізу, найпоширеніші методи, які добре зарекомендували себе на практиці.

Для студентів нематематичних спеціальностей вищих навчальних закладів, а також для фахівців, які займаються аналітичною діяльністю та проблемами прийняття рішень.

ББК 14я73

ISBN 966-608-486-4

© Н. Б. Чорней, Р. К. Чорней, 2005
© Міжрегіональна Академія
управління персоналом (МАУП), 2005

Н. Б. Чорней, Р. К. Чорней

ТЕОРІЯ СИСТЕМ
І СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ

Переднє слово

Цей навчальний посібник задумано як настільну книгу не лише для студентів, навчальні плани яких передбачають вивчення курсу теорії систем і системного аналізу, а й для багатьох фахівців, практична діяльність яких потребує професійного підходу до аналізу складних економічних, соціальних, психологічних, політичних та інших явищ. Велику увагу приділено викладенню як сучасних, так і вже добре відомих на практиці методів прийняття рішень. Для цього подано багатий ілюстративний матеріал у вигляді рисунків, таблиць, блок-схем.

Багато положень пропонованого посібника можуть спричинити суперечки щодо належності того чи іншого матеріалу до предмета теорії систем і системного аналізу. Іще більше матеріалу не ввійшло до нього. Річ у тім, що курс теорії систем і системного аналізу вирізняється такою багатогранністю підходів до його вивчення, що охопити їх усі неможливо в одній книжці. Лише для опису методів системного аналізу потрібна окрема енциклопедія достатньо великого обсягу. Однак основною метою підготовки цього посібника було подати основні напрями розвитку системного аналізу, його принципи й етапи, а також показати доконечну потребу в його вивченні, пов'язану з природною властивістю людського мислення — застосуванням системного підходу до розв'язання навіть побутових повсякденних проблем. Саме це має спонукати студентів до вивчення тих принципів і методів, які можуть значно полегшити та пришвидшити їхню роботу.

Про потребу в швидкому прийнятті рішень ідеться насамперед тому, що сучасний світ характеризується постійним збільшенням “темпу життя”. Якщо 30 років тому комп’ютер був чимось дивовижним, то тепер мало не щороку швидкодія сучасних електронно-обчислювальних машин збільшується вдвічі. Зрозуміло, що з плином часу прийняття швидких, практично вкрай потрібних, обґрунтованих рішень даватиме беззаперечну перевагу в конкурентній боротьбі. Автори мають надію, що в цьому може допомогти матеріал, викладений у посібнику, та рекомендації щодо його використання.

Цей посібник було написано після декількох років викладання авторами однойменного курсу студентам напрямів “Соціологія”, “Психологія”, “Політологія”, “Економіка та підприємництво”, “Менеджмент”. У ньому міститься також теоретичний матеріал з деяких розділів математики та її застосувань, який, утім, під час першого читання посібника можна пропустити. Це не завадить скласти уявлення про предмет. Однак для глибшого опанування викладеного предмета вивчення цих теоретичних положень видається вкрай потрібним.

Автори плекають надію на те, що навчальний посібник “Теорія систем і системний аналіз” допоможе не лише студентам, а й усім його читачам у їхній практичній діяльності та наукових пошуках.

Наталія та Руслан Чорней

==== Частина I ====

Теорія систем

Розділ 1

МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ

Перш ніж перейти до викладення теорії систем і системного аналізу, потрібно ввести поняття моделі, оскільки саме на ньому базується й означення системи, і її розуміння.

Спочатку моделлю називали якийсь допоміжний засіб, об'єкт, що в певній ситуації заміняв інший об'єкт. Стародавні філософи вважали неможливим моделювати природні процеси, тому що, на їхню думку, природні та штучні процеси підпорядковані різним законам. Вони були переконані, що відобразити природу можна

лише за допомогою логіки, методів роздумів, суперечок, тобто, за сучасною термінологією, мовних моделей. Через кілька сторіч девізом англійської Королівської наукової спілки стало гасло: “Нічого словами!”; визнавалися лише висновки, підкріплені експериментально чи математичними викладками. В англійській мові дотепер у поняття “наука” не входять галузі знання, яким в українській мові відповідає термін “гуманітарні науки”, — їх віднесено до категорії “мистецтв”. Тому досить довго поняття “модель” стосувалося лише матеріальних об’єктів спеціального типу (манекен, модель корабля чи літака, опудало).

Усвідомлення основних особливостей таких моделей зумовило створення численних означень, подібних до такого: **моделлю** називається об’єкт-замінник, що за певних умов може замінити об’єкт-оригінал, відтворюючи цікаві для нас властивості та характеристики оригіналу, до того ж має важливі переваги зручності (наочність, подібність, доступність випробувань, легкість оперування ним тощо). Потім було усвідомлено модельні властивості креслень, карт — реальних об’єктів штучного походження, що втілюють абстракцію досить високого рівня. Наступним кроком стало визнання того, що моделями можуть бути не тільки реальні об’єкти, але й абстрактні побудови (наприклад, математичні моделі). У результаті діяльності математиків, логіків і філософів було створено *теорію моделей*. У ній модель означають як результат відображення однієї абстрактної математичної структури на іншу, також абстрактну, чи як результат інтерпретації першої моделі в термінах і образах іншої.

У сучасному розумінні **моделювання** — невід’ємний етап будь-якої цілеспрямованої діяльності, тобто модель — це не просто образ — заміник оригіналу, не будь-яке відображення, а *цільове*. Наприклад, з поліна можна розпалити багаття, зробити стіл, створити художній твір. Отже, для різних цілей зазвичай потрібні різні моделі.

1.1. Класифікація моделей

1.1.1. Пізнавальні та прагматичні моделі

Пізнавальні моделі — це форма організації та подання знань за допомогою об'єднання нових знань з наявними. Тому якщо є розбіжність між моделлю та реальністю, виникає задача усунення цієї розбіжності за допомогою зміни моделі. Пізнавальна діяльність орієнтована переважно на наближення моделі до реальності, яку відображає модель.

Прагматичні моделі — це засіб керування й організації практичних дій, спосіб подання зразково правильних дій чи їх результату, тобто робоче подання цілей. Тому застосування прагматичних моделей полягає в тому, щоб у разі виявлення розбіжностей між моделлю та реальністю спрямувати зусилля на зміну реальності в напрямку наближення її до моделі. Отже, прагматичні моделі мають нормативний характер; вони відіграють роль стандарту, зразка, під які слід “підганяти” як саму діяльність, так і її результат (кодекси законів, статuti організацій, алгоритми, технологічні допуски).

Інакше кажучи, пізнавальні моделі відображають суще, а прагматичні — те, чого немає, але його бажано (і можливо) здійснити.

1.1.2. Статичні та динамічні моделі

Модель конкретного стану об'єкта, своєрідна його “моментальна фотографія”, називається **статичною**. Приклад такої моделі — **структурна модель** (від лат. *structura* — склад, розташування, порядок). Так називають модель, що описує сукупність стійких зв'язків об'єкта.

Якщо моделі пов'язані не з одним станом, а з різницею між ними, виникає потреба у відображенні процесу зміни стану. Такі моделі називаються **динамічними** (наприклад, функціональні).

1.2. Способи втілення моделей

1.2.1. Абстрактні моделі та роль мов

Абстрактні моделі — це ідеальні конструкції, побудовані засобами мислення, свідомості. Розглянемо як приклад природну мову. Нею ми можемо говорити про все, це універсальний засіб побудови будь-яких абстрактних моделей. Така універсальність забезпечена можливістю не тільки вводити в мову нові слова, але й ієрархічно будувати все розвинутіші мовні моделі (слово — речення — текст). Універсальність мови досягається також завдяки тому, що мовні моделі неоднозначні, розпливчасті, розмиті. Це дає змогу відобразити будь-яку ситуацію з достатньою для звичайних практичних цілей точністю.

На практиці рано чи пізно виникають ситуації, коли наближеність мови до природної стає недоліком, для подолання якого виробляють “професійну” мову. Найяскравіші приклади цього — мови конкретних наукових дисциплін. Моделі спеціальних наук точніші й конкретніші, вони містять більше інформації. Нові знання акумулюються в нових моделях. Якщо для їх побудови бракує старих мовних засобів, створюють іще більш спеціалізовані мови. Отже, виникає ієрархія типів мовних моделей. Математичні моделі найточніші, але для їх використання в певній області потрібно одержати достатню для цього кількість знань. Нематематичність наукової дисципліни не означає, що вона “ненаукова”; це наслідок її складності, недостатньої пізнаванності її предмета.

1.2.2. Матеріальні моделі та види подібності

Матеріальна модель — це в певному розумінні замітник оригіналу; між оригіналом і моделлю має бути відношення подібності.

Відношення, установлене в результаті фізичної взаємодії (чи ланцюжка фізичних взаємодій) у процесі створення моделі, називається **прямим** (наприклад, фотографії, масштабовані моделі літаків або суден, макети будинків, шаблони, викрійки).

Непряме відношення подібності між оригіналом і моделлю

об'єктивно існує в природі; воно проявляється як збіг або достатня близькість їх абстрактних моделей, завдяки чому його використовують у практиці реального моделювання. Наведемо такі приклади непрямих моделей: годинник — модель часу; автопілот — модель льотчика.

Умовними називають моделі, подібність яких до оригіналу можна встановити на основі певної угоди, наприклад: гроші — модель вартості, посвідчення особи — модель людини, карта — модель місцевості.

1.3. Моделі систем

Існує багато означень системи з різним ступенем формалізації. Поняття моделі дає змогу легко пояснити множинність означень системи: означення — це мовна модель системи, тому різні цілі та вимоги до моделі зумовлюють різні означення. Крім того, різні мовні середовища також спричинюють видозмінення означень. Тому подамо поняття системи в його розвитку.

1.3.1. Проблеми та системи

Почнемо зі штучних систем. Будь-яка діяльність людини має цільовий характер. Мету, яку ставить перед собою людина, вона досить рідко досягає лише завдяки її власним можливостям або зовнішнім засобам, якими вона володіє в певний момент. Такий стан називають **проблемною ситуацією**.

Мета — це абстрактна модель не наявного, але бажаного стану середовища, яке б давало змогу розв'язати проблему, що виникла. Уся подальша діяльність людини спрямована на розв'язання цієї проблеми, досягнення поставленої мети. Отже, маємо *перше означення системи*: **система** — це засіб досягнення мети. Наприклад, забезпечити швидке переміщення великої кількості людей за їхнім бажанням у межах міста — це мета, а міський транспорт — система.

1.3.2. Модель “чорного ящика”

Перше означення системи нічого не говорить про її внутрішній устрій. Тому її можна подати як “чорний ящик”, виокремлений із навколишнього середовища. Таким способом ми отримали дві важливі властивості системи: цілісність і відокремленість від середовища.

Але навіть відокремлена від середовища система не зовсім ізольована від нього. Зв’язки, що відбивають зміни навколишнього середовища, зроблені чи заплановані системою, називаються **виходами** системи, а зв’язки, що відображають вплив на систему, — її **входами**.

Ми побудували модель системи, яка називається “чорним ящиком” (рис. 1).

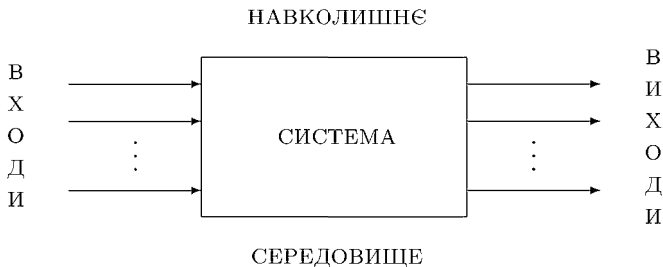


Рис. 1. Модель “чорного ящика”

Досліджуючи реальні системи, часто досить важко однозначно визначити входи та виходи системи. Наприклад, для системи “підприємство” персонал можна вважати одним із входів, оскільки він безпосередньо впливає на систему, і її складовою частиною. Найчастіше персонал відносять до складу системи, але це не догма, бо поділ елементів на входи й виходи залежить насамперед від мети побудови моделі системи.

1.3.3. Модель складу системи

Цілісність і відокремленість — це зовнішні властивості системи. Внутрішність системи неоднорідна, що дає змогу розрізняти складові частини системи.

Елементами називають ті частини системи, що розглядаються як неподільні. Інші частини системи називаються **підсистемами**. У разі потреби можна ввести терміни, що відображають ієрархію частин (наприклад, “підпідсистеми” чи “підсистеми такого-то рівня”).

Отримуємо **модель складу системи**, що описує підсистеми й елементи, з яких її утворено. Розглянемо спрощений приклад такої моделі (табл. 1).

Таблиця 1

Модель складу родини

Система	Підсистема	Елемент
РОДИНА	Члени родини	Чоловік
		Дружина
		Предки
		Нашадки
		Інші родичі
	Майно родини	Спільне житло та господарство
		Особисте майно членів родини

Зрозуміло, що в наведеному прикладі елементи “спільне житло та господарство” й “особисте майно членів родини” можна розглядати як підсистеми другого рівня (або підпідсистеми) й описати елементи, з яких вони складаються. Якщо ж наша мета — скласти модель будь-якої родини, то подальша деталізація відобразатиме лише деякі родини (можливо, більшість), а не родину взагалі¹.

¹У наведеному прикладі виокремлені елементи підсистеми “члени родини” також можуть бути далеко не в кожній родині, тобто можна вважати “членів родини” не підсистемою, а елементом системи “родина”.

1.3.4. Модель структури системи

Далеко не завжди достатньо мати “ящик” зі всіма окремими його деталями. Потрібно ще й правильно з’єднати деталі між собою чи встановити між елементами певні зв’язки — **відношення**. Сукупність необхідних і достатніх для досягнення мети відношень між елементами системи називається **структурою системи**.

Отже, маємо *друге означення системи*: **система** — це сукупність взаємозалежних елементів, яка відокремлена від середовища та взаємодіє з нею як ціле. Це означення охоплює моделі “чорного ящика”, складу та структури. Усі разом вони утворюють ще одну модель, яку називають **структурною схемою системи**; є також терміни “білий ящик”, “прозорий ящик”, а також “**конструкція системи**”.

1.3.5. Динамічні моделі систем

Дотепер розглянуті варіанти системи можна вважати **статичними** моделями. Системи, у яких згодом відбуваються якісь зміни, називаються **динамічними**, а моделі, що відображають ці зміни — **динамічними моделями систем**.

Розрізняють два типи динаміки системи: її функціонування та розвиток. **Функціонування** — це процеси, що відбуваються в системі та її навколишньому середовищі, які стабільно реалізують фіксовану мету. **Розвитком** називається те, що відбувається з системою внаслідок зміни її цілей.

Система не завжди перебуває у фазах функціонування чи розвитку. Під час реконструкції одного цеху інші можуть функціонувати, а завод у цілому — розвиватися. Можливі й такі системи, для функціонування яких певні її підсистеми мають постійно розвиватися (наприклад, конструкторські бюро).

1.4. Штучні та природні системи

Одна з основних ознак системи — її структурованість, доцільність зв’язків між її елементами. Виникає запитання: на досягнення

яких цілей спрямоване функціонування природних систем і, якщо такі цілі існують, то хто їх поставив?

Очевидно, що якщо мета, для досягнення якої існує система, невідома, то це ще не означає, що об'єкт перестає бути системою. Отже, можуть існувати системи з невідомими нам цілями чи будовою. Вивчаючи такі системи, потрібно насамперед пізнати об'єкт як систему, знайти її призначення (мету) або спосіб дії.

Існування **штучних** (створених людиною) і **природних** (що виникли в природі без участі людини) систем зумовлює розширення поняття мети.

Мету штучної системи означають як ідеальний образ бажаного результату її діяльності, тобто образ того, що мало б бути, здійснитися (частка “б” означає, що цілі бувають як здійсненні, так і нездійсненні). Такий ідеальний образ майбутнього стану системи та її навколишнього середовища називається **суб'єктивною метою**.

Уявімо, що минув термін, призначений на реалізацію суб'єктивної мети; система та її навколишнє середовище набули якогось реалізованого стану. У цей стан система потрапила об'єктивно, тобто в результаті реалізації об'єктивних закономірностей. Стосовно минулого моменту, коли результат ще тільки планувався, цей стан можна назвати **об'єктивною метою** системи. Інакше кажучи, майбутній стан системи — це його об'єктивна мета.

Отже, будь-який об'єкт можна розглядати як систему, проте лише з певного погляду, щодо конкретної мети.

1.5. Класифікації систем

Порівнюючи та розрізняючи системи, уважаючи одні з них однаковими, інші — різними, виконують їх **класифікацію**. Класифікація — це лише модель реальності. Якщо потрібно розрізнити системи одного класу, виокремлюють **підкласи** й отримують багаторівневу, ієрархічну класифікацію.

Щоб упорядкувати підходи до класифікації систем, скористаємося загальною схемою функціонування керованої системи (рис. 2), виокремивши систему S , **керовану** за допомогою керування U ,

і керувальну систему, що виконує це керування. Для реалізації керування U потрібно передбачити його наслідок, тобто потрібна модель усієї ситуації, за допомогою якої керувальна система визначає, яке керування подавати на вхід системи. Це ілюструє рис. 2, де схему зображено ще раз усередині керувального блока.

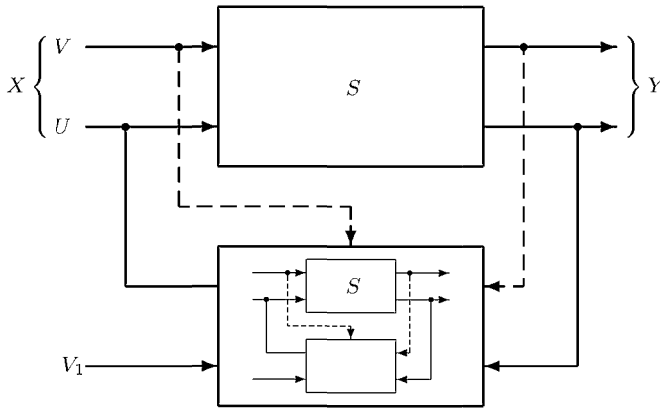


Рис. 2. Схема функціонування керованої системи

Схему функціонування керованої системи S слід читати так. Входи X складаються з двох частин: некерованої V та керувальної U ; після перетворень у системі S входи X перетворюються на виходи Y . Керувальну частину входів U виробляє керувальна система, на яку, у свою чергу, діють некеровані входи V_1 і яка містить інформацію про керовану систему S . Крім того, до керувальної системи надходить інформація про виходи Y системи S , а також, можливо, — про некеровані входи V (цю можливість на рис. 2 зображено штриховими стрілками).

1.5.1. Класифікація систем за їх походженням

Зобразимо класифікацію систем за їх походженням (рис. 3). Повнота класифікації першого рівня логічно зрозуміла. Вона містить штучні, змішані та природні системи. **Штучною** називають систему, створену людиною як засіб досягнення поставленої (суб'єктивної) мети, а **природною** — систему, що виникла в природі в результаті спонтанних процесів без участі людини (або систему — засіб досягнення об'єктивної мети).

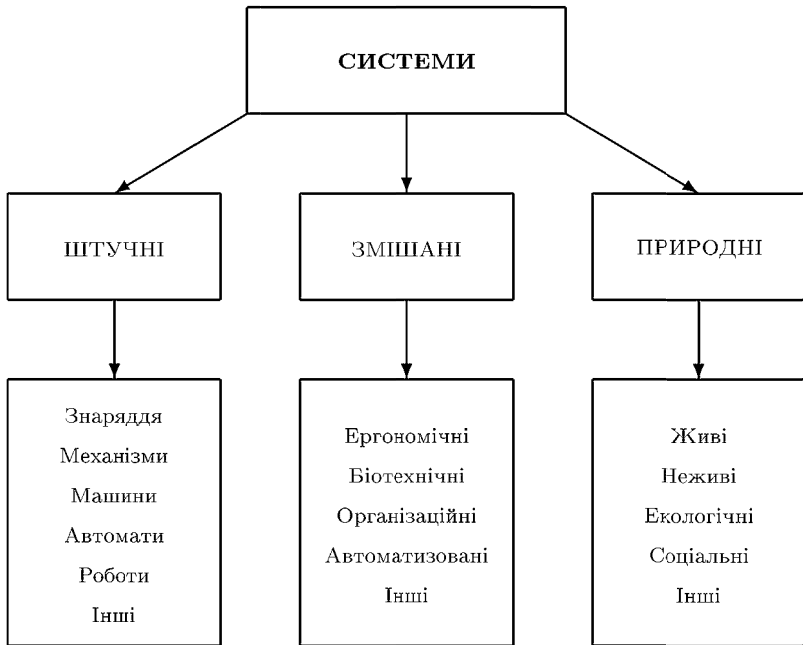


Рис. 3. Класифікація систем за їх походженням

Другий рівень класифікації неповний через незавершений розвиток багатьох систем, описаних на першому рівні. Означимо деякі

терміни, використовувані на другому рівні класифікації систем за їх походженням.

Механізм — це засіб, який людина використовує для підвищення ефективності роботи.

Автомат (від гр. *automatos* — той, що сам діє) — це пристрій (скупність пристроїв), що за заданою програмою без особистої участі людини виконує всі операції в процесах одержання, перетворення, передачі та розподілення (використання) енергії, матеріалів або інформації. Програму автомата може бути задано в його конструкції (годинник, торговий автомат) або ззовні — за допомогою перфокарт, магнітних або оптичних носіїв тощо (ЕОМ, верстат із програмним керуванням), копіювальними чи моделювальними пристроями (аналогова обчислювальна машина, система стеження, інтерполятор).

Автоматизація — це застосування технічних засобів, економіко-математичних методів і систем керування, які частково чи цілком звільняють людину від особистої участі в процесах одержання, перетворення, передачі та використання енергії, матеріалів або інформації. Можна автоматизувати такі процеси:

- технологічні, енергетичні, транспортні й інші;
- проектування складних агрегатів, суден, промислових споруд, виробничих комплексів;
- організацію, планування та керування в цеху, на підприємстві, будівництві, в області, у військовій частині, з'єднанні тощо;
- наукові дослідження, медичне й технічне діагностування, облік і обробку статистичних даних, програмування, інженерні розрахунки тощо.

Мета автоматизації — підвищити продуктивність і ефективність праці, поліпшити якість продукції, оптимізувати управління, звільнити людину від роботи в умовах, небезпечних для здоров'я. Автоматизація — один з основних напрямків науково-технічного прогресу.

Робот — це автоматичний програмно-керований маніпулятор, що виконує робочі операції зі складними переміщеннями в просторі.

Ергономіка (від гр. *ergon* — робота й *nomos* — закон) — галузь науки, що вивчає людей і їх діяльність на виробництві з метою вдосконалювання знарядь, умов і процесу роботи. Основний об'єкт

дослідження ергономіки — системи “людина — машина”; метод дослідження — системний підхід.

Біотехнічна система — це сукупність взаємопов’язаних і взаємозалежних біологічних і технічних систем чи об’єктів.

Організаційна система складається з людських колективів, що мають потрібні засоби для досягнення мети.

Екологічна система (від гр. *oikos* — житло, місце перебування) — це єдиний природний комплекс, утворений живими організмами й середовищем їх проживання (атмосферою, ґрунтом, водою тощо), у якому живі та неживі компоненти пов’язані між собою обміном речовини й енергії. Поняття екосистеми застосовне до природних об’єктів різної складності та розмірів: океану чи невеликого ставка, тайги чи ділянки березового гаю.

1.5.2. Класифікація систем за описом змінних

Наведемо трирівневу класифікацію систем за типом вхідних (X), вихідних (Y) і внутрішніх (Z) (якщо опис виконано не на рівні “чорного ящика”) змінних (рис. 4). На другому рівні класифікації систем **із якісними змінними** розрізняють випадки, коли систему описано засобами природної мови, і випадки, коли формалізація глибша. Другий рівень класифікації систем **із кількісними змінними** відображає відмінності методів дискретної та неперервної математики. Для систем **зі змішаним описом** другий рівень являє собою об’єднання класів двох перших гілок. Третій рівень однаковий для всіх класів другого рівня.

Дамо означення термінів, використаних на рис. 4.

Змістовним називають найзагальніший словесний опис без конкретних характеристик (наприклад, “тварина”); **формалізованим** — опис із зазначенням конкретних загальновідомих якісних характеристик (наприклад, “змінна належить до класу хижих тварин”).

Тепер означимо *типи змінних*:

- **дискретними** називаються такі змінні, множина можливих значень яких зліченна (наприклад, дні тижня, поштучна кількість чого-небудь);

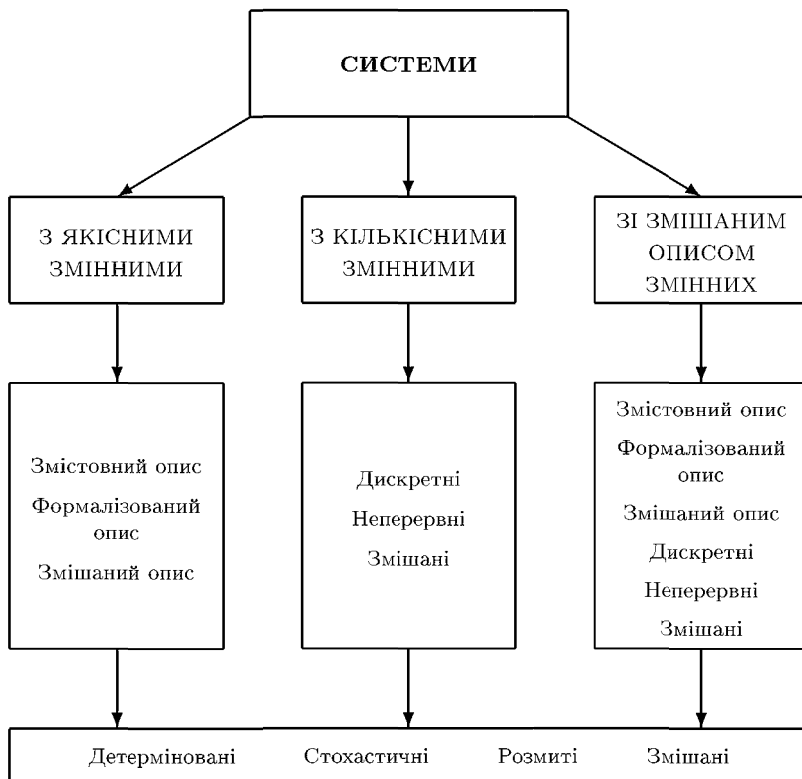


Рис. 4. Класифікація систем за описом змінних

- **неперервними** — змінні, множина можливих значень яких незліченна (наприклад, довжина, маса);
- **детермінованими** — змінні, значення яких можливо передбачити до проведення експерименту;
- **стохастичними** — змінні, для яких можна знайти ймовірнісний розподіл, тобто до експерименту ми не знаємо, якого значення набуде змінна, але знаємо, з якою ймовірністю вона може набути значення з якоїсь множини;

- **розмитими** — змінні, належність яких до певного класу залежить від додаткових наперед не відомих умов (наприклад, в одних випадках високою можна вважати людину, зріст якої більше 180 см, а в інших — більше 200 см, наприклад у баскетболі).

1.5.3. Класифікація систем за типом їх операторів

Розглянемо класифікацію систем за типом їх операторів, тобто класифікацію типів зв'язків між вхідними та вихідними змінними (рис. 5).

На першому рівні розміщено класи систем, що відрізняються ступенем відомості оператора S . Класифікації наступних рівнів для “чорного ящика” немає: оператор S вважають узагалі невідомим, тобто невідомо, як вхідні дані перетворюються у вихідні.

Якщо інформація про оператор S настільки загальна, що модель неможливо звести до параметризованого функціонального вигляду (наприклад, такого: “функція $Y = S(X)$ неперервна, монотонна тощо”), то система **непараметризована**.

Якщо наші знання про оператор S дають змогу застосувати параметричну модель, тобто записати залежність $y(t)$ від $x(t)$ явно з точністю до скінченної кількості параметрів $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$: $y(t) = S(x(\cdot), \theta)$, то система **параметризована**.

Нарешті, якщо й ці параметри задано точно, то будь-яка невизначеність зникає, і ми маємо систему з цілком визначеним оператором, тобто “білий ящик”.

Подальші рівні класифікації подано на рис. 5 лише для останніх двох класів систем. Означимо терміни другого, третього та четвертого рівнів:

- **інерційним (із пам'яттю)** називається оператор, який враховує залежність від історії системи, а не то оператор називають **безінерційним (без пам'яті)**;

- **замкненим (зі зворотним зв'язком)** називається оператор, який залежить не лише від входів системи, а й від її виходів, тобто замкнений оператор ураховує вихідну інформацію системи, а не то оператор називають **розімкненим**;

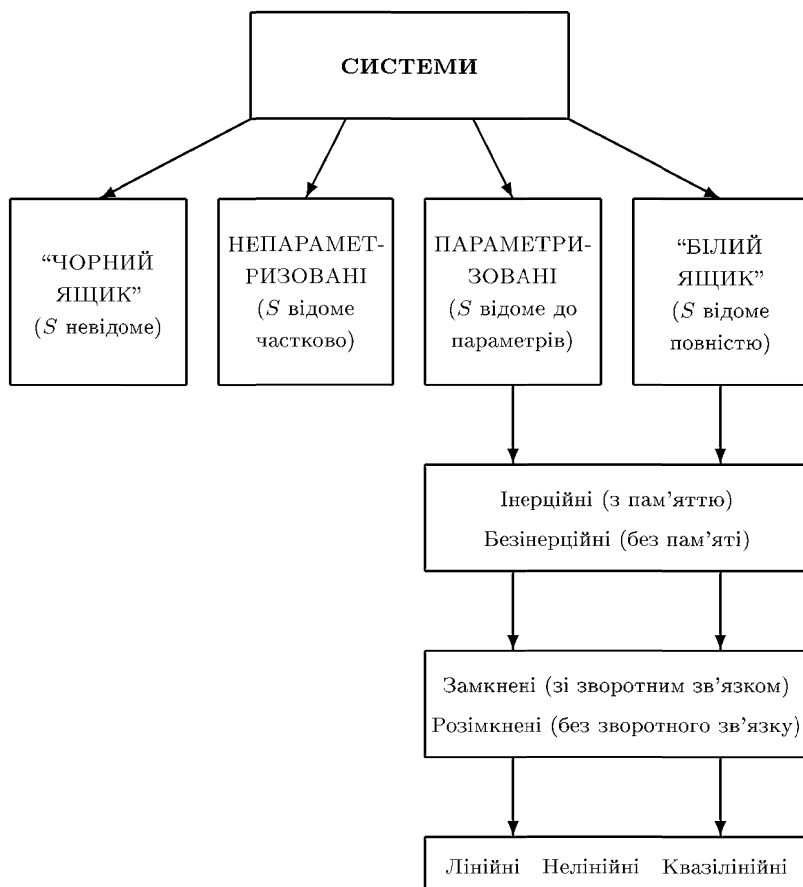


Рис. 5. Класифікація систем за типом їх операторів

- **лінійним** називають оператор, який перетворює вхідні дані на вихідні за лінійним законом, тобто степінь вхідних даних у кожному з доданків такого перетворення дорівнює одиниці, а не то оператор називають **нелінійним**;
- **квазілінійним** (від лат. *quasi* — ніби, нібито) називають опе-

ратор, характеристики якого максимально наближені до характеристик лінійного оператора, але не лінійні. Зазвичай за допомогою квазілінійних операторів спрощують нелінійну залежність, коли таке спрощення зумовлює мінімальні втрати інформації про об'єкт.

1.5.4. Класифікація систем за способом керування

Перший рівень класифікації систем за способом керування показує, чи входить до системи керувальний пристрій (рис. 6).



Рис. 6. Класифікація систем за способом керування

Другий рівень містить чотири основні типи керування, які різняться ступенем відомості траєкторії, що приводить систему до мети, і можливості керувальної системи утримувати керовану систему на цій траєкторії.

I тип: траєкторія та правильне керування $u_0(t)$ відомі. Тоді можна не звертати уваги на розвиток подій. Такий тип керування називають **керуванням без зворотного зв'язку**.

II тип: процеси на некерованих входах $v_0(t)$ відрізняються від передбачених раніше чи дія неврахованих входів виявляється істотною, і система “сходить із потрібної траєкторії”. Потрібна інформація про поточну траєкторію $y(t)$, а також додаткове керування для повернення виходів системи на потрібну траєкторію $y_0(t)$. Такий спосіб керування називається **регулюванням**. Приклад регулювання в біології — рефлексі.

III тип: неможливо задати опорну програмну траєкторію на весь період часу чи відхилення від неї настільки велике, що неможливо повернутися до неї. Керування полягає в **підстроюванні параметрів** системи доти, доки траєкторія $y(t)$ не перетне цільову область.

IV тип: мета для даної системи недосяжна. Тоді змінюють структуру системи в пошуках такої, щоб можна було потрапити в цільову область. Отже, виконують перебір різних систем з однаковими входами X . Таке керування називається **структурною адаптацією**.

1.5.5. Класифікація систем за ступенем ресурсної забезпеченості керування

Щоб керовальна система могла виконувати свої функції, потрібна модель керованої системи, на якій досліджують різні типи керування. Для того щоб модель “запрацювала”, чи була **актуалізована**, треба витратити ресурси: потрібно не тільки втілити модель у якомусь реальному вигляді, але й забезпечити отримання рішення потрібної якості й у потрібний момент часу.

Наявні ресурси не завжди дають змогу повністю виконати ці умови, тому виникають принципово різні ситуації залежно від ступеня забезпеченості керування ресурсами. Це відображено в класифікації систем на рис. 7.

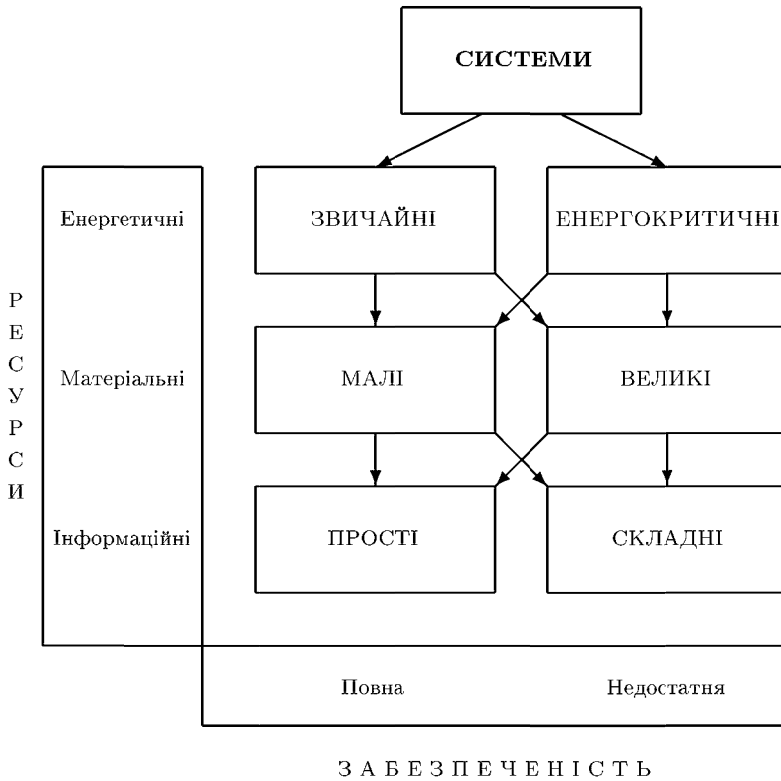


Рис. 7. Класифікація систем за ступенем ресурсної забезпеченості керування

Розглянемо енергетичні витрати на актуалізацію моделі й організацію керування. Зазвичай вони дуже малі порівняно з кількістю енергії, споживаної чи вироблюваної в керованій системі, тому їх просто не беруть до уваги. Однак виникають ситуації, коли, по-перше, керовальна та керована системи живляться від одного обмеженого джерела енергії, і, по-друге, енергоспоживання обох систем має однаковий порядок: виникає нетривіальний клас задач про

найкращий розподіл енергії між ними. Такі задачі доводиться розв'язувати не часто, але у відповідальних випадках (наприклад, енергоємні задачі для автономних систем, зокрема космічних апаратів або дослідницьких роботів).

Системи, моделювання яких проблематичне внаслідок їх великої розмірності, називаються **великими**.

Перевести великі системи в розряд малих можна двома способами:

- 1) розробити потужніші обчислювальні засоби;
- 2) розкласти багатовимірну задачу на сукупність зв'язаних задач меншої розмірності (якщо природа системи дає змогу зробити це).

Складною називається система, у моделі якої бракує інформації для ефективного керування. Отже, властивість простоти чи складності — це відношення між керованою та керувальною системами чи між системою та її моделлю.

Зробити складну систему простою можна двома способами:

- 1) з'ясувати конкретну причину складності, одержати інформацію, якої бракувало, і включити її в модель — основне завдання науки й пізнання взагалі та системного аналізу зокрема;
- 2) змінити мету (у технічних системах це зазвичай неефективно, але у відносинах між людьми може бути єдиним виходом).

Щоб було зрозуміліше, чим різняться великі та складні системи, зазначимо можливі чотири варіанти систем:

- малі прості;
- малі складні;
- великі прості;
- великі складні.

Наведемо приклади систем усіх видів (у тому самому порядку):

- справні побутові прилади (праска, годинник, телевізор тощо) — для користувача; несправні — для майстра; шифрозамок — для власника сейфа;
- несправний побутовий прилад — для користувача;
- шифрозамок — для викрадача (проста тому, що достатньо лише перебрати всі варіанти, і велика тому, що для відкриття сейфа може не вистачити часу на перебір варіантів); точний прогноз погоди

на наступний день; повний міжгалузевий баланс (його визначають із затримкою на роки);

- мозок; економіка; живий організм.

1.6. Ієрархія систем

Поняття ієрархії досить важливе. Його застосовують тоді, коли потрібно впорядкувати системи відповідно до різних категорій, одна з яких має враховувати ступінь складності функцій компонентів системи.

У спрощеному вигляді ієрархію систем можна подати за допомогою таких рівнів.

1. Неживі системи:

- статичні структури, які називають *кістяками*;
- прості динамічні структури із заданим рухом, притаманні навколишньому фізичному світу; їх називають *часовими механізмами*;
- кібернетичні системи з керованими циклами зворотного зв'язку; їх називають *термостатами*.

2. Живі системи:

- відкриті системи із самозбережною структурою; рівень клітин — це перший ступінь, на якому можливий поділ на живе та неживе;
- живі організми з низькою здатністю сприймати інформацію, наприклад рослини;
- живі організми з більш розвинутою здатністю сприймати інформацію, але без “самосвідомості”; до цієї категорії належать тварини;
- люди з їхньою самосвідомістю, мисленням і нетривіальною поведінкою;
- соціальні системи та соціальні організації;
- трансцендентні системи, поки що не пізнані людьми.

Організація — це (принаймні, частково) самокерована система, що має такі характеристики:

- *сутність*: це система типу “людина — машина”;

- *структура*: організація має бути здатна обирати напрями діяльності, відповідальність за яку може бути розподілена між її елементами на основі їх функцій, розміщення чи інших ознак;
- *комунікація*: у визначенні поведінки та взаємодії підсистем в організації важливу роль відіграє комунікація;
- *вибір рішень*: учасники повинні розподілити між собою завдання та напрями діяльності.

Запитання та завдання до розділу 1

1. Дайте означення моделі.
2. Що таке пізнавальні моделі?
3. До якого типу моделей належать:
 - правила дорожнього руху;
 - рецепт виготовлення морозива;
 - карта зоряного неба?
4. У чому різниця між статичною та динамічною моделями?
5. Наведіть приклади абстрактних моделей.
6. За яких умов фотографія належить до класу умовних моделей?
7. Дайте означення мети.
8. Як пов'язані мета й система? Відповідь обґрунтуйте.
9. Що таке модель “чорного ящика”?
10. Що таке модель складу системи?
11. Сформулюйте означення системи, використовуючи модель структурної схеми системи.
12. Чим відрізняються динамічні та статичні системи? Наведіть приклади систем, які залежно від мети можуть бути й статичними, і динамічними.
13. Наведіть приклад системи, різні підсистеми якої перебувають у різних станах: функціонування та розвитку.
14. За якою ознакою системи можна поділити на штучні та природні?
15. Що таке об'єктивна мета?
16. Які типи систем ви знаєте?
17. Накресліть і поясніть схему функціонування керованої системи.
18. Наведіть класифікацію систем за їх походженням.

19. Наведіть класифікацію систем за описом змінних.
20. Що таке оператор системи?
21. Наведіть класифікацію систем за типом операторів системи.
22. Наведіть класифікацію систем за способом керування. Які типи керування вам відомі?
23. Наведіть класифікацію систем за ступенем ресурсної забезпеченості керування.
24. Виберіть довільну систему й опишіть її за допомогою різних класифікацій.
25. Наведіть приклади систем усіх типів за ступенем ресурсної забезпеченості керування.
26. Деталізуйте наведену вище ієрархію систем.

Розділ 2

ІНФОРМАЦІЙНІ АСПЕКТИ ВИВЧЕННЯ СИСТЕМИ

Якщо станам одного об'єкта відповідають стани іншого, то говорять, що один об'єкт відображає інший, містить інформацію про нього.

2.1. Сигнали в системах

Сигнал — це матеріальний носій інформації, засіб перенесення інформації в просторі та часі. Той самий об'єкт може являти собою різні сигнали, тобто як сигнали використовують не самі по собі об'єкти, а їх стани. Не будь-який стан має сигнальні властивості. Точніше, об'єкт взаємодіє не тільки з тим об'єктом, інформацію про який ми хочемо одержати, але й з іншими об'єктами, які нас не цікавлять. У результаті відповідність станів послаблюється, руйнується.

Умови, що забезпечують установлення сигнальної відповідності станів та сприяють її збереженню, називають **кодом**, а побічні впливи, які порушують цю відповідність, — **шумами**.

2.1.1. Типи сигналів

Для переміщення інформації в просторі й часі, а також для створення сигналів можна використовувати лише об'єкти, стани яких досить стійкі в часі чи до зміни положення в просторі. Є два типи таких сигналів.

Статичними називаються сигнали, що являють собою стабільні стани фізичних об'єктів (книга, фотографія).

Динамічними називаються сигнали, які являють собою динамічні стани силових полів. Ці поля характеризуються тим, що зміну їх стану не можна локалізувати в якійсь частині поля, і це зумовлює поширення збурення. Конфігурація цього збурення під час поширення досить стійка, що забезпечує збереження сигнальних властивостей (звуків, радіосигналів).

Динамічні сигнали використовують переважно для передачі, а статичні — для збереження інформації.

Сигнали в системах відіграють особливо важливу роль. Якщо енергетичні та матеріальні потоки, образно кажучи, живлять систему, то потоки інформації, що переносяться сигналами, організовують усе її функціонування, керують нею.

2.1.2. Випадковий процес — математична модель сигналів

Є істотна різниця між просто станом $x(t)$ об'єкта й сигналом $x(t)$. Вона полягає в тому, що єдина функція $x(t)$ не вичерпує всіх важливих властивостей сигналів. З поняття функції випливає, що для кожного t відоме значення $x(t)$ чи правило його обчислення. Якщо воно відоме одержувачеві сигналу, то немає потреби передавати його: функцію $x(t)$ можна без того відтворити на приймальному кінці. Отже, єдина однозначна функція дійсного аргументу не може бути моделлю сигналу. Така функція набуває сигнальних властивостей лише тоді, коли вона одна з можливих. Інакше кажучи, моделлю сигналу може бути **набір (ансамбль)** функцій параметра t , причому до передачі невідомо, яку з них буде відправлено; це стає відомим одержувачеві лише після передачі. Кожна така конкретна функція

називається **реалізацією**. Отже, запровадивши ймовірнісну міру на множині реалізацій, ми одержали математичну модель, яка називається **випадковим процесом**.

2.1.3. Класи випадкових процесів

Неперервні та дискретні в часі процеси. Випадковий процес із неперервним часом характеризується тим, що його реалізації можна визначити для всіх моментів з якогось (скінченного чи нескінченного) інтервалу T параметра t (наприклад, проведення хімічного експерименту). Дискретний у часі процес заданий на дискретному ряді точок часової осі, зазвичай рівновіддалених (наприклад, щоденний курс валют).

Неперервні та дискретні за інформативним параметром процеси. Ці процеси розрізняють залежно від того, з якої (неперервної чи дискретної) множини набуває значень реалізація x випадкової величини X .

Стаціонарні та нестаціонарні процеси. Так називають процеси залежно від сталості чи мінливості їх статистичних характеристик. Випадковий процес називається **стаціонарним у вузькому розумінні**, якщо для будь-якого n скінченновимірні розподіли ймовірностей не змінюються в часі, тобто для кожного τ виконується умова

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_n(x_1, x_2, \dots, x_n \mid t_1 + \tau, t_2 + \tau, \dots, t_n + \tau) = \\ = \mathbf{P}_n(x_1, x_2, \dots, x_n \mid t_1, t_2, \dots, t_n). \end{aligned}$$

Якщо ж умова незалежності від часу виконується лише для перших двох моментів, то процес називається **стаціонарним у широкому розумінні**.

Ергодичні та неергодичні процеси. Ергодичністю називається вимога збігу величин, отриманих усередненням за ансамблем і за часом. Як і для стаціонарності, можна розрізняти ергодичність у вузькому та широкому розумінні.

2.1.4. Математичні моделі реалізацій випадкових процесів

Гармонічні сигнали. Позначимо як S_c множину всіх синусоїдних сигналів:

$$S_c = \{x: x(t) = S \cos(\omega t + \varphi); -\infty < t < +\infty; S, \omega \in \mathbb{R}^+; \varphi \in [0; 2\pi]\},$$

де S — амплітуда; ω — колова частота ($\omega = 2\pi f$, f — частота); φ — фаза гармонічного коливання; \mathbb{R}^+ — множина всіх додатних дійсних чисел.

Модульовані сигнали. У технічних системах корисну інформацію може переносити який-небудь один параметр гармонічного коливання. Зі зміною цього параметра в часі коливання перестає бути гармонічним. Процес зміни параметра синусоїди називається **модуляцією**, а виділення цієї зміни в чистому вигляді, начебто зняття модуляції, — **демодуляцією**. Саме коливання називається **коливанням-носієм**.

Розрізняють **амплітудну**, **частотну** та **фазову** модуляцію залежно від того, який параметр коливання-носія містить корисну інформацію (параметри з індексом 0 вважають постійними):

$$S_{\text{амп}} = \left\{ x: x(t) = S(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \right\},$$

$$S_{\text{част}} = \left\{ x: x(t) = S_0 \cos(\omega(t)t + \varphi_0) \right\},$$

$$S_{\text{фаз}} = \left\{ x: x(t) = S_0 \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) \right\}.$$

Періодичні сигнали. Сигнали називаються **періодичними**, а часовий інтервал τ — **періодом**, якщо

$$S_\tau = \{x: x(t) = x(t + \tau); -\infty < t < +\infty\}.$$

Сигнали з обмеженою енергією. Про сигнали з множини

$$S_e = \left\{ x: \int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt \leq K < +\infty \right\}$$

говорять, що їх енергія обмежена величиною K .

Сигнали обмеженої тривалості. Інтервал T називається **тривалістю сигналу** $x(t)$, якщо

$$S_e = \{x: x(t) \equiv 0, t \notin T\};$$

зазвичай передбачають, що всередині цього інтервалу $x(t)$ не всюди набуває значення 0.

Особливу роль серед сигналів з обмеженою тривалістю відіграють **імпульсні сигнали**. Вони вирізняються короткочасністю інтервалу T , яку важко формалізувати, але на практиці такі сигнали можна описати як звуки типу “вибух”, “удар” тощо. Тоді $x(t)$ називають **формою імпульсу**.

Сигнали з обмеженою смугою частот. Перетворення Фур’є $X(f)$ часової реалізації $x(t)$ сигналу називається її **спектром**:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{2\pi ift} dt.$$

З погляду фізики спектр коливання $x(t)$ — це сума (у загальному випадку — інтеграл) складових його гармонічних коливань з амплітудами $|x(t)|$, частотами f і відповідними фазами. Між $x(t)$ й $X(f)$ є взаємно однозначна відповідність, тому що

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{-2\pi ift} df.$$

Умова існування й оборотності перетворення Фур’є — обмеженість енергії сигналу та його неперервність.

Якщо функція $X(f)$ на осі f має обмежену “тривалість” F , то говорять, що сигнал $x(t)$ має обмежену смугу частот шириною F :

$$S_B = \left\{ x: X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{2\pi ift} dt = 0 \text{ для всіх } f > |F| \right\}.$$

2.2. Ентропія

Перше специфічне поняття теорії інформації — невизначеність випадкового об'єкта. Для неї введено кількісну міру, названу ентропією. Наведемо простий приклад. Нехай якась подія може відбутися з імовірністю 0,99 і не відбутися з імовірністю 0,01, а інша подія має ймовірності відповідно 0,5 і 0,5. Очевидно, що в першому випадку результатом дослідів “майже напевно” буде настання події, а в другому невизначеність результату настільки велика, що від прогнозування бажано взагалі відмовитися.

Як міру невизначеності випадкового об'єкта A зі скінченною множиною можливих станів A_1, A_2, \dots, A_n з відповідними ймовірностями p_1, p_2, \dots, p_n беруть величину

$$H(A) = H(\{p_i\}) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i,$$

яку називають **ентропією** випадкового об'єкта A (чи розподілу $\{p_i\}$). Переконаємося, що цей функціонал має властивості, досить природні для міри невизначеності.

1. $H(p_1, p_2, \dots, p_n) = 0$ тоді й тільки тоді, коли яке-небудь з p_i дорівнює одиниці (а інші — нулю). Це відповідає випадку, коли результат дослідів можна передбачити напевно, тобто немає жодної невизначеності. У всіх інших випадках ентропія додатна.

2. $H(p_1, p_2, \dots, p_n)$ набуває свого найбільшого значення в разі

$$p_1 = p_2 = \dots = p_n = \frac{1}{n},$$

тобто якщо невизначеність максимальна.

3. Виконується нерівність $H(A) \geq H(A | B)$, де умовну ентропію $H(A | B)$ визначають як математичне сподівання умовного розподілу. Ця нерівність узгоджується з інтуїтивним уявленням про те, що знання стану об'єкта B може лише зменшити невизначеність об'єкта A , а якщо вони незалежні, то залишає її незмінною.

2.3. Кількість інформації

Процес одержання інформації можна інтерпретувати як зміну невизначеності в результаті прийому сигналу. Наведемо приклад для випадку, коли передача сигналу відбувається за таких умов:

- 1) корисний (відправлений) сигнал являє собою послідовність статистично незалежних символів з імовірностями $p(x_i)$, $i = \overline{1, n}$;
- 2) одержуваний сигнал являє собою послідовність символів y_k того самого алфавіту;
- 3) якщо немає шумів (спотворень), то одержуваний сигнал збігається з відправленим — $y_k = x_i$;
- 4) якщо є шум, то даний символ або залишається тим самим (i -м), або замінюється будь-яким іншим символом (k -м) з імовірністю $p(y_k | x_i)$;
- 5) спотворення наступного символу — це подія, статистично незалежна від тієї, яка відбулася з попередніми символами.

Отже, до одержання чергового символу ситуація характеризується невизначеністю того, який символ буде відправлено, тобто **апріорною ентропією** $H(X)$. Після одержання символу y_k невизначеність щодо того, який символ було відправлено, змінюється: якщо немає шуму, вона взагалі зникає (оскільки точно відомо, що було передано символ $x_k = y_k$), а якщо шум є, ми не можемо бути впевненими, що отримали відправлений символ, і виникає невизначеність, що характеризується **апостеріорною ентропією**

$$H(X | y_k) = H(\{p(x_i | y_k)\}) > 0.$$

Визначимо **кількість інформації** як міру знятої невизначеності: числове значення кількості інформації про об'єкт дорівнює різниці його апріорної й апостеріорної ентропії, тобто

$$I(X, Y) = H(X) - H(X | Y).$$

Властивості кількості інформації

1. Кількість інформації у випадковому об'єкті X щодо об'єкта Y дорівнює кількості інформації в Y відносно X :

$$I(X, Y) = I(Y, X).$$

2. Кількість інформації невід'ємна:

$$I(X, Y) \geq 0.$$

3. Для дискретних X правдива рівність

$$I(X, X) = H(X).$$

4. Перетворення $\varphi(\cdot)$ однієї випадкової величини не може збільшити інформацію, що міститься в ній, про іншу пов'язану з нею величину:

$$I(\varphi(X), Y) \leq I(X, Y).$$

5. Для незалежних пар величин кількість інформації адитивна:

$$I(\{X_i, Y_i\}) = \sum_i I(X_i, Y_i).$$

2.4. *Одиниці виміру ентропії та кількості інформації*

З означень кількості інформації I та ентропії H випливає їх безрозмірність, а з лінійності зв'язку між ними — однаковість одиниць виміру. Для визначеності будемо говорити про ентропію. У дискретному випадку візьмемо за одиницю невизначеність випадкового об'єкта — такого, що

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i = 1.$$

Щоб визначити одиницю виміру ентропії однозначно, потрібно конкретизувати кількість n станів об'єкта й основу логарифма. Візьмемо для визначеності найменшу кількість можливих станів, за якої об'єкт ще залишається випадковим, тобто $n = 2$, а за основу логарифма — також число 2. Тоді з рівності

$$-p_1 \log_2 p_1 - p_2 \log_2 p_2 = 1$$

впливає, що

$$p_1 = p_2 = \frac{1}{2}.$$

Отже, одиницею невизначеності служить ентропія об'єкта з двома рівномірними станами. Її називають **бітом**. Іншу одиницю — **ніт** — отримують, використовуючи натуральні логарифми; її застосовують для неперервних величин.

Запитання та завдання до розділу 2

1. Дайте означення сигналу.
2. Які ви знаєте типи сигналів? Наведіть приклади.
3. Що таке випадковий процес? Яку роль відіграє випадковий процес в описі сигналів? Чому?
4. Наведіть приклади випадкових процесів, які описують сигнали.
5. Які класи випадкових процесів ви знаєте?
6. Дайте означення ентропії.
7. Чим апіорна ентропія відрізняється від апостеріорної? Наведіть приклад.
8. Що таке кількість інформації?
9. Як ентропія пов'язана з кількістю інформації?
10. Сформулюйте властивості кількості інформації.
11. У яких одиницях вимірюється ентропія та кількість інформації?

Розділ 3

ВИМІРЮВАННЯ

3.1. Експеримент і модель

Експерименти з об'єктом проводять для того, щоб уточнити його модель, тому постановку експерименту визначає наявна модель. Не тільки дослідження — критерій істинності моделі, але й модель диктує постановку експерименту, тому що остання впливає з потреби перевірки чи уточнення моделі.

Розглянемо можливості дослідів (тобто практичної взаємодії) із системами на прикладі “чорного ящика”. Вибір входів і виходів — це побудова моделі, що визначає організацію дослідів. Якщо ми тільки реєструємо події на обраних входах і виходах, то дослід називається **пасивним експериментом** (або **спостереженням**). Якщо ми не тільки спостерігаємо (і фіксуємо) те, що відбувається на входах і виходах, але й впливаємо на деякі з них (одні навмисно підтримуємо незмінними, інші змінюємо так, як потрібно), то дослід називається **активним** (або **керуваним**) **експериментом**.

Результати дослідів реєструють, фіксують за допомогою вимірювань — зображення результатів дослідів у вигляді символів, номерів або чисел.

Сучасне розуміння експерименту таке. Є явища, для яких у принципі неможливо ввести числову міру (наприклад, “кількість мате-

ринської любові”), але які можна фіксувати в “слабких”, якісних шкалах і враховувати ці результати в моделях, одержуючи якісні, але цілком наукові висновки.

Розпливчастість деяких спостережень — їх невід’ємна природна властивість, якій надано строгої математичної форми, розроблено апарат обробки результатів таких спостережень.

Хоча вважають, що чим точніше вимірювання, тим краще, похибки вимірювань — це не щось побічне, неприродне (сторонні перешкоди, результат недбалості чи огріхів оператора тощо), а невід’ємна, природна та немінуча властивість самого процесу вимірювання. Моделі, які перевіряють на практиці, мають бути гіпотезами не тільки про досліджуваний об’єкт, але й про похибки вимірювання.

Дуже поширені статистичні вимірювання, тобто оцінювання функціоналів розподілів імовірностей, пов’язаних із реалізацією випадкового процесу; цей клас вимірювань важливий тому, що більшість тимчасових залежностей входів і виходів має сигнальний характер. Для таких вимірювань потрібна спеціальна методика та техніка.

3.2. Вимірювальні шкали

Вимірювання — це алгоритмічна операція, яка заданому спостережуваному стану об’єкта чи процесу ставить у відповідність певне позначення: число, номер або символ. Це забезпечує інформативність результатів вимірювань про спостережуваний об’єкт; кількість же інформації залежить від повноти цієї відповідності та розмаїтості варіантів. Потрібну нам інформацію ми одержуємо з результатів вимірювань за допомогою їх перетворень або обробки експериментальних даних.

Ступінь відповідності між станами та їх позначеннями залежить не тільки від організації вимірювань (тобто від експериментатора), але й від природи досліджуваного явища.

Ми будемо розглядати лише такі об’єкти, про будь-які два стани яких можна сказати, розрізняються вони чи ні, і тільки такі алгоритми вимірювання, які різним станам ставлять у відповідність різні

позначення, а нерозрізнюваним станам — однакові. Це означає, що як стан об'єкта, так і його позначення задовольняють таким **аксіомам тотожності**:

- 1) або $A = B$, або $A \neq B$;
- 2) якщо $A = B$, то $B = A$;
- 3) якщо $A = B$ та $B = C$, то $A = C$.

3.2.1. Кількісне визначення та вимірювання

Номер — це матеріальний або квазіматеріальний символ. Номери мають властивість упорядкованості лише внаслідок довільній домовленості. До номерів незастосовні правила додавання та віднімання. Що стосується чисел, то це математичне поняття. Вони мають властивість упорядкованості внаслідок їх “реальності”. На відміну від номерів, до чисел застосовні закони додавання та віднімання.

Відмінність між кількістю та якістю пов'язана з різницею між кількістю речовини та її властивостями. Уважають, що кількість речовини в тілі — це щось таке, що збільшується після об'єднання двох тіл, а властивість (якість) речовини — ознаки, які не змінюються внаслідок об'єднання двох однакових тіл. Отже, характеристики речовини, що задовольняють закону додавання (мають властивість адитивності), — це кількісні показники речовини, а ті, для яких закон додавання не діє, — якісні. Наприклад, маса, об'єм, довжина — кількісні характеристики, а питома вага, концентрація — якісні (хоча їх також можна подати за допомогою чисел, тобто кількісно).

Тіла можуть мати властивості, до яких застосовні шкали вимірювання з різним ступенем вільності та силою. У разі вимірювання характеристик речовини виконуються такі умови:

- 1) існують два види характеристик: кількісні та якісні;
- 2) вимірювати можна обидва види характеристик, але, узагалі кажучи, кількісні характеристики припускають вимірювання “вищого рівня”, ніж якісні;
- 3) “рівень” вимірювання характеристики залежить від її властивостей — транзитивності, симетричності, адитивності тощо, що визначають шкалу вимірювання, яку можна застосовувати.

3.2.2. Шкали найменувань

Припустімо, що кількість розпізнаваних станів (математичний термін — кількість **класів еквівалентності**) скінченна. Кожному стану поставимо у відповідність позначення, відмінне від позначень інших класів. Тоді вимірювання полягає в тому, щоб, провівши експеримент над об'єктом, визначити належність результату до того чи іншого класу еквівалентності й записати це за допомогою символу, який позначає цей клас. Такий процес називається вимірюванням у **шкалі найменувань** (іноді цю шкалу називають також **номінальною** чи **класифікаційною**); її утворює зазначена множина символів.

Найприродніше використовувати шкалу найменувань для класифікації дискретних за своєю природою явищ (наприклад, різних об'єктів). Позначати класи можна як словами природної мови (наприклад, географічні назви, власні імена людей тощо), довільними символами (герби та прапори держав, емблеми родів військ, різноманітні значки тощо), номерами (реєстраційні номери автомобілів, офіційних документів, номери на майках спортсменів), так і різноманітними комбінаціями (наприклад, поштові адреси, екслібриси приватних бібліотек, печатки тощо). Усі ці позначення еквівалентні простій нумерації, але на практиці часто віддають перевагу іншим позначенням.

Перейдемо до питання про допустимі операції над даними, вираженими в номінальній шкалі. **Ще** раз наголосимо, що позначення класів — це лише символи, навіть якщо для цього використано номери. Номери лише зовні мають вигляд чисел, але не мають їх властивостей. Якщо в одного спортсмена на спині номер 4, а в іншого — 8, то можна тільки дійти висновку, що це різні учасники змагань; не можна сказати, наприклад, що один із них удвічі кращий чи що в одного форма новіша. *З номерами не можна поводитись як із числами, за винятком визначення їх рівності чи нерівності*: тільки ці відношення визначено між елементами номінальної шкали.

Тому в процесі обробки експериментальних даних, зафіксованих у номінальній шкалі, безпосередньо із самими даними можна виконувати лише операцію перевірки їх збігу чи розбіжності. Зобразимо

цю операцію за допомогою **символу Кронекера**

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x_i = x_j, \\ 0, & \text{якщо } x_i \neq x_j, \end{cases}$$

де x_i й x_j — записи результатів різних вимірювань.

Із результатами цієї операції можна виконувати складніші перетворення: рахувати кількість збігів (наприклад, кількість спостережень k -го класу дорівнює $n_k = \sum_{j=1}^n \delta_{kj}$, де n — загальна кількість спостережень), обчислювати відносні частоти класів (наприклад, відносну частоту k -го класу $w_k = n_k/n$), порівнювати ці частоти між собою (визначаючи, наприклад, моду — номер класу, який зустрічається найчастіше, — $Mo = \arg \max_k w_k$), виконувати різні статистичні процедури, слідкуючи, однак, щоб у цих процедурах із вихідними даними не було виконано ніяких операцій, крім перевірки їх на збіг (наприклад, можна застосовувати χ^2 -тест, інші тести на відносних частотах, критерій згоди тощо).

3.2.3. Порядкові шкали

Якщо природа спостережуваної (вимірюваної) ознаки стану дає змогу не тільки ототожнити його з одним із класів еквівалентності, але й якимось порівнювати різні класи, то для вимірювання можна вибрати “сильнішу” шкалу, ніж номінальна.

Наступна за “силою” після номінальної **порядкова шкала** (її називають також **ранговою**). Її можна застосувати, якщо крім аксіом тотожності 1–3 класи задовольняють таким **аксіомам упорядкованості**:

- 4) якщо $A > B$, то $B < A$ (**антисиметричність**);
- 5) якщо $A > B$ та $B > C$, то $A > C$ (**транзитивність**).

Позначивши такі класи символами й установивши між цими символами ті самі відношення порядку, отримаємо **шкалу простого порядку**. Приклади її застосування — нумерація черговості, військові звання, прізиви місця в конкурсі.

Іноді виявляється, що не кожну пару класів можна впорядкувати за перевагою: деякі пари вважаються рівними. Тоді аксіоми 4 та 5 видозмінюють:

- 4') якщо $A \geq B$, то $B \leq A$;
- 5') якщо $A \geq B$ та $B \geq C$, то $A \geq C$.

Шкала, що задовольняє аксіомам 4' і 5', називається **шкалою слабкого порядку**. Приклад такої шкали — упорядкування за ступенем близькості з конкретною особою (мати = батько > син = дочка, дядько = тітка < брат = сестра тощо).

Інша ситуація виникає, коли є пари класів, *непорівнянні* між собою, тобто ні $A \geq B$, ні $B \geq A$. Тоді говорять про **шкалу часткового порядку**. Такі шкали часто виникають у соціологічних дослідженнях суб'єктивних переваг. Наприклад, у разі вивчення купівельного попиту суб'єкт часто не в змозі оцінити, який саме з двох різнорідних товарів йому більше подобається; людині може бути складно також упорядкувати за перевагою улюблені заняття (читання літератури, плавання, смачна їжа, слухання музики тощо).

Характерна риса порядкових (у строгому розумінні) шкал — те, що відношення порядку нічого не говорить про “дистанцію” між порівнюваними класами. Тому порядкові експериментальні дані, навіть зображені цифрами, не можна розглядати як числа. Над ними не можна виконувати дії, що дають різні результати в разі перетворення шкали, яке не порушує порядку. Наприклад, не можна обчислювати вибіркове середнє порядкових вимірів, тобто $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, тому що перехід до монотонно перетвореної шкали $x' = f(x)$ у разі усереднення дає $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x'_i \neq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$. Однак операція, що дає змогу виявити, яке з двох спостережень, x_i чи x_j , має перевагу, допустима. Уведемо індикатор невід'ємних чисел — функцію

$$C(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t \geq 0, \\ 0, & \text{якщо } t < 0. \end{cases}$$

Тоді якщо $x_i > x_j$ і ми ввели цифрову шкалу порядку, то $C(x_i - x_j) = 1$, а $C(x_j - x_i) = 0$, що дає змогу виявити перевагу x_i перед x_j .

Число

$$R_i = \sum_{j=1}^n C(x_i - x_j),$$

де n — кількість порівнюваних об'єктів ($1 \leq R_i \leq n$), називається **рангом i -го об'єкта**. (Звідси походить інша назва порядкових шкал — рангові.) Якщо існує слабкий порядок, то частина спостережень збігається (у статистиці така група спостережень називається **зв'язкою**), і всі члени зв'язки одержують однаковий (старший для них) ранг. Коли це незручно, членам зв'язки присвоюють або ранг, середній для зв'язки (**мідранг**), або випадково — від молодшого до старшого.

Отже, у разі вимірювань у порядкових (у строгому розумінні) шкалах обробка даних має ґрунтуватися тільки на допустимих для цих шкал операціях — обчисленні δ_{ij} і R_i . Із цими числами можна працювати далі вже довільно: крім обчислення частот і мод (як і для номінальної шкали), з'являється можливість визначити вибірку медіану (тобто спостереження з рангом R_i , найближчим до числа $n/2$); можна розбити всю вибірку на частини в будь-якій пропорції, обчислюючи вибіркові квантілі будь-якого рівня p , $0 < p < 1$ (тобто спостереження з рангом R_i , найближчим до величини np); можна визначити коефіцієнти рангової кореляції між двома серіями порядкових спостережень (r_s Спірмена, τ Кендалла); будувати за допомогою отриманих величин інші статистичні процедури.

3.2.4. Модифіковані порядкові шкали

Досвід роботи з сильними шкалами та бажання зменшити відносність порядкових шкал, додати їм хоча б зовнішньої незалежності від вимірюваних величин спонукають дослідників до різних модифікацій, які дещо посилюють порядкові шкали. Іще одна важлива причина спроб посилити шкали полягає в тому, що багато вимірюваних у порядкових (принципово дискретних) шкалах величин мають дійсний або уявний неперервний характер: сила вітру чи землетрусу, твердість речовини, глибина та міцність знань, оволодіння навичками тощо. Сама можливість введення між двома значеннями третього

сприяє тому, щоб намагатися підсилити шкалу.

Усе це зумовило появу та використання на практиці низки рядкових шкал, але не в такому строгому розумінні, як ті, про які йшлося вище. При цьому іноді з отриманими даними поводяться як із числами, що спричиняє помилки та неправильні рішення. Розглянемо деякі з відомих модифікацій.

Шкала твердості за Моосом. Із двох мінералів твердіший той, котрий залишає на іншому подряпини чи вм'ятини після досить сильного зіткнення. Відношення “*A* твердіше ніж *B*” — типове відношення порядку. У 1811 р. німецький мінералог Ф. Моос (F. Mohs) запропонував запровадити стандартну шкалу для визначення відносної твердості методом дряпання. Як еталони взято 10 мінералів, розміщених у порядку висхідної твердості: 1 — тальк, 2 — гіпс, 3 — кальцит, 4 — флюорит, 5 — апатит, 6 — ортоклаз, 7 — кварц, 8 — топаз, 9 — корунд, 10 — алмаз.

Шкала сили вітру за Ботфортом. У 1806 р. Ф. Ботфорт запропонував умовну 12-бальну шкалу для оцінки сили вітру за його дією на наземні предмети та за хвилюванням моря: 0 — штіль (затишшя), 4 — помірний вітер, 6 — сильний вітер, 10 — буря (шторм), 12 балів — ураган.

Шкала магнітуд землетрусів за Ріхтером. Американський сейсмолог Ч. Ріхтер у 1935 р. запропонував класифікацію землетрусів за магнітудами, що базується на оцінці енергії сейсмічних хвиль, які виникають під час землетрусів, і разом із Б. Гуттенбергом теоретично обґрунтував її в 1941–1945 рр. Співвідношення між магнітудою землетрусу за шкалою Ріхтера та його силою в епіцентрі за 12-бальною шкалою залежить від глибини поштовху.

Бальні шкали оцінки знань учнів. Потреба суспільства в офіційному визначенні ступеня кваліфікованості тих, хто вчиться, незалежно від того, де, коли та як вони здобувають освіту, сприяла запровадженню загальноприйнятих шкал оцінювання знань учнів у балах. Усі відчувають, зокрема й на власному досвіді, неточність, близькість цієї шкали. Один із методів поліпшення шкали балів полягає в збільшенні кількості градацій. Однак і це не розв'язує проблеми, і викладачі неофіційно (для себе) уводять додаткові градації — додають до балів плюси, мінуси, крапки. Навіть застосовуючи

100-бальну шкалу, деякі викладачі використовують дробові бали. Усе це відбувається тому, що не існує ні абсолютного взірця, єдиного для всіх людей, ні навіть умовного загальнодоступного стандарту на зразок еталонів твердості чи висоти хвиль, і знання можна оцінювати тільки в порядковій шкалі. Проте мало хто (не тільки з учнів, але й з викладачів) розуміє, що бальна шкала належить до класу порядкових. Доходить до того, що навіть в офіційних питаннях, що впливають на долі людей, підраховують середньоарифметичний бал — величину, що не має змісту в порядковій шкалі!

Порядкова шкала Черчмена й Акоффа. У соціологічних дослідженнях часто виявляється корисним запропонувати опитуваному не тільки впорядкувати заданий перелік альтернатив, але й зазначити, хоча б грубо, силу переваги. Проілюструємо цей метод вимірювання на прикладі.

Нехай є чотири предмети. Спочатку опитуваний упорядковує їх за перевагою: $A \geq B \geq C \geq D$. Потім його просять поставити у відповідність (приписати) предметам будь-які числа між нулем і одиницею, грубо виразивши “силу” переваги. Нехай результат такий:

A	B	C	D
1,00	0,85	0,75	0,20

За допомогою подальших запитань намагаються отримати дійсну шкалу переваг опитуваного. Наприклад, виявляють, що для нього переважає — A чи B , C та D разом узяті. Результат потрібно відобразити у вагових коефіцієнтах. Роблять припущення, що ваговий коефіцієнт сукупності альтернатив дорівнює сумі їх вагових коефіцієнтів. Якщо, наприклад, $A > B \cap C \cap D$, приписують нові коефіцієнти:

A	B	C	D
1,00	0,65	0,20	0,10

Далі запитують, як можна впорядкувати B та $C \cap D$. Якщо, на думку опитуваного, $C \cap D > B$, то зменшують вагу B так, щоб вона

була меншою ніж сума ваг C та D :

A	B	C	D
1,00	0,25	0,20	0,10

Інші початкові ваги для тих самих запитань і відповідей можуть залишатися незмінними, якщо вони відразу відповідали зазначеним вимогам. Щоб зменшити кількість переbrаних комбінацій під час уточнення шкали, автори методу пропонують приписувати найкращій альтернативі одиничну вагу, а інші групувати по три та діяти за описаною методикою.

Основний предмет критики порядкової шкали Черчмена й Акофа — припущення про адитивність ваг переваги. У психології ця умова нерідко не виконується: опитуваний може оцінювати хліб із маслом інакше, ніж сумою ваг хліба та масла окремо.

3.2.5. Шкали інтервалів

Якщо можна впорядкувати об'єкти настільки точно, що відомі відстані між будь-якими двома з них, то вимірювання виявиться помітно сильнішим, ніж у шкалі порядку. Природно виражати всі відстані хоча й у довільних одиницях, але однакових уздовж усієї шкали. Це означає, що рівні інтервали вимірюють однаковими за довжиною відрізками шкали, хоч де вони розміщені. Наслідок такої рівномірності шкал цього класу — незалежність відношення двох інтервалів від того, у якій шкалі їх вимірювали (тобто яка одиниця довжини інтервалу та яке значення взято як початок відліку). Справді, якщо два інтервали в одній шкалі виражаються числами Δ_1x і Δ_2x , а за іншого вибору нуля й одиниці — числами Δ_1y і Δ_2y , то, оскільки це ті самі інтервали, маємо $\frac{\Delta_1x}{\Delta_2x} = \frac{\Delta_1y}{\Delta_2y}$, звідки випливає, що введені шкали можуть мати довільні початки відліку й одиниці довжини, а зв'язок між показниками в них лінійний:

$$y = ax + b, \quad a > 0, \quad -\infty < b < +\infty.$$

Це відношення можна виразити словами: “шкала інтервалів єдина з точністю до лінійних перетворень”. Побудовані таким способом шкали називаються інтервальними.

Назва “шкала інтервалів” свідчить про те, що *в цій шкалі тільки інтервали мають зміст дійсних чисел* і тільки над ними можна виконувати арифметичні операції: якщо виконати операції над самими відліками на шкалі, забувши про їх відносність, то можна одержати безглузді результати. Наприклад, якщо сказати, що температура води збільшилася вдвічі після її нагрівання від 9 до 18° за шкалою Цельсія, то для тих, хто звик користуватися шкалою Фаренгейта, це буде звучати дуже дивно, тому що в цій шкалі температура води в тому самому досліді змінилася від 37 до 42° .

Крім обчислення значення символу Кронекера та рангу спостереження єдина нова допустима операція над спостереженнями в інтервальній шкалі — визначення інтервалу між ними. Над інтервалами ж можна виконувати будь-які арифметичні операції, а також застосовувати всі придатні способи статистичної й іншої обробки даних.

Приклади величин, які за фізичною природою не мають абсолютного нуля чи допускають свободу вибору в установленні початку відліку й тому вимірюються в інтервальних шкалах, — температура, час, висота місцевості.

3.2.6. Шкали відношень

Нехай спостережувані величини задовольняють не тільки аксіомам 4 та 5, але й **аксіомам адитивності**:

- 6) якщо $A = P$ та $B > 0$, то $A + B > P$;
- 7) $A + B = B + A$;
- 8) якщо $A = P$ та $B = Q$, то $A + B = P + Q$;
- 9) $(A + B) + C = A + (B + C)$.

Це істотно посилює шкалу: результати вимірювань у ній — “повноправні” числа; над ними можна виконувати будь-які арифметичні дії, тому що віднімання, множення та ділення — лише частинні випадки додавання. Запроваджена таким способом шкала називається **шкалою відношень**. Цей клас шкал має таку особливість:

відношення двох значень вимірюваної величини не залежить від того, у якій шкалі зроблено вимірювання: $\frac{x_1}{x_2} = \frac{y_1}{y_2}$. Цій вимозі задо-

вольняє співвідношення вигляду $y = ax$ ($a \neq 0$). Отже, величини, вимірювані в шкалі відношень, мають природний, абсолютний нуль, хоча залишається свобода у виборі одиниць. Приклади таких величин — довжина, маса, електричний опір, вартість.

3.2.7. Шкали різниць

До шкал, єдиних з точністю до лінійних перетворень, належать шкала інтервалів ($y = ax + b$, $a > 0$, $-\infty < b < +\infty$) і шкала відношень ($y = ax$, $a \neq 0$). Розглянемо особливості шкал, інваріантних до зміщення $y = x + b$.

Повторно застосовуючи зміщення до y ($z = y + b = x + 2b$), а потім до z і так далі, виявляємо, що в такій шкалі значення не змінюється після будь-якої кількості зміщень: $y = x + nb$, $n = 0, 1, 2, \dots$. Стала величина b — це параметр шкали, який називається її **періодом**. Отриману шкалу називають **шкалою різниць** (іноді — також **циклічною** чи **періодичною**). У таких шкалах вимірюють напрямки з однієї точки (шкала компаса, роза вітрів тощо), час доби (циферблат годинника), фазу коливань (у градусах або радіанах).

Циклічні шкали — частинний випадок інтервальних. Однак угода про хоча й довільний, але єдиний для нас початок відліку шкали дає змогу розглядати показання в цій шкалі як числа, застосовувати до них арифметичні дії (доти, доки хтось не забуде про умовність нуля, наприклад у разі переходу на літній час або навпаки).

3.2.8. Абсолютна шкала

Розглянемо шкалу з абсолютним нулем і абсолютною одиницею. Вона не єдина з точністю до якогось перетворення, а просто єдина, унікальна. Саме такі якості має числова вісь, яку природно назвати **абсолютною шкалою**. Важлива особливість абсолютної шкали порівняно з усіма іншими — абстрагованість (безрозмірність) і абсолютність її одиниці. Це дає змогу виконувати над показаннями аб-

солотної шкали операції, неприпустимі для показань інших шкал, — використовувати їх як показник степеня й аргумент логарифма. Числові вісь явно використовують як вимірювальну шкалу для лічби предметів, а також як допоміжний засіб — у всіх інших шкалах. Внутрішні властивості числової осі, попри ілюзорну її простоту, надзвичайно різноманітні, і теорія чисел дотепер не вичерпала їх.

Основні відомості про всі розглянуті нами вимірювальні шкали наведено в табл. 2. Можна сказати, що чим сильніша шкала, у якій виконують вимірювання, тим більше інформації про досліджуваний об'єкт, явище чи процес можна отримати. Тому природним є прагнення кожного дослідника провести вимірювання в якнайсильнішій шкалі.

Вибираючи шкалу вимірювання, слід орієнтуватися на об'єктивні відношення, яким підпорядкована спостережувана величина, і найкраще робити вимірювання в шкалі, яка максимально погоджена з цими відношеннями. Можна вимірювати й у слабшій шкалі, ніж узгоджена, але застосовувати сильнішу шкалу небезпечно: отримані дані не матимуть тієї сили, на яку орієнтовано їх обробку.

3.3. Розпливчастий опис ситуацій

Трапляється (частіше, ніж це здається), що не можна з повною впевненістю твердити про тотожність або розбіжності двох станів або спостережень. Найбільш явно це видно на прикладі шкал, у яких класи позначено конструкціями природної мови. Так, у виразі: “У кімнату ввійшла висока молода людина” — названо клас, до якого належить людина (тобто вимірювання відбулося), але якого зросту та скільки їй років? Якщо розібратися, то майже кожне слово означає якусь не цілком визначену множину. Це невід’ємна та, безумовно, корисна властивість природної мови (інакше вона б не закріпилася в процесі розвитку мови), але вона призводить до утруднень, коли притаманна їй невизначеність заважає.

Вимірювальні шкали

Назва шкали	Визначальні відношення	Еквівалентне перетворення шкал	Допустимі операції над даними (первинна обробка)	Вторинна обробка даних
Номінальна	Еквівалентність	Перестановки найменшів	Обчислення символу Кронекера δ_{ij}	Обчислення відносних частот і операції над ними
Порядкова	Еквівалентність, перевага	Не змінює порядку (монотонне)	Обчислення δ_{ij} та рангу R_i	Обчислення відносних частот і вибірко-вих квантилів, операції над ними
Інтервальна	Еквівалентність, перевага, збереження відношень інтервалів	Лінійне перетворення $y = ax + b$, $a > 0$, $b \in \mathbb{R}$	Обчислення δ_{ij} , рангу R_i й інтервалів (різниць між спостереженнями)	Арифметичні дії над інтервалами
Циклічна	Еквівалентність, перевага, збереження відношень інтервалів, періодичність	Зміщення $y = x + nb$, $b = \text{const}$, $n = 0, 1, \dots$	Те саме	Те саме
Відношень	Еквівалентність, перевага, збереження відношень інтервалів, збереження відношення двох значень	Розтягнення $y = ax$, $a > 0$	Усі арифметичні операції	Будь-яка придатна обробка
Абсолютна	Еквівалентність, перевага, збереження відношень інтервалів, збереження відношення двох значень, абсолютна та безрозмірна одиниця, абсолютний нуль	Шкала унікальна	Усі арифметичні операції, використання як показника степеня й аргументу логарифма	Будь-яка потрібна обробка

Невідомо, чи це дійсний факт, чи науковий фольклор, що ґрунтується на потенційній можливості, але в літературі з автоматизації перекладу наводять історію про кільцеву роботу програм, що перекладають з однієї мови на іншу, згідно з якою фраза: “Плоть слабка, а дух сильний” — після декількох перекладів перетворилася на: “М’ясо тухле, але горілка міцна”.

Усе це мотивує введення поняття **лінгвістичної змінної** як такої, значення якої розпливчає за своєю природою (подібно до міток розмитої, розпливчатої множини).

Викладемо основні поняття **теорії розпливчастих множин**.

Розпливчата множина A складається з невизначеної кількості елементів x : ознаки, за якими елементи включено в розпливчасту множину, не дають змоги однозначно відокремити всі елементи, що входять до неї, від тих, що не належать їй; принаймні деякі елементи можна вважати такими, що як належать множині, так і не належать їй.

Дуже важливе поняття функції належності $\mu_A(x)$. Уважають, що для кожного елемента x можна задати число $\mu_A(x)$, $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$, яке виражає ступінь належності цього елемента до розпливчатої множини A . Якщо $\mu_A(x) = 0$, то елемент x достоту не належить множині A , якщо $\mu_A(x) = 1$ — достоту належить. Величина $\mu_A(x)$, розглядувана як функція аргументу x , називається **функцією належності**. Якщо $\mu_A(x)$ набуває тільки значень 0 або 1, то множина A **нерозпливчата**.

Отже, **розпливчасту множину** A в X означають як сукупність упорядкованих пар вигляду

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, \quad x \in X.$$

Порожню розпливчасту множину \emptyset означають як таку, що $\mu_{\emptyset}(x) \equiv 0$.

Іноді зручно використовувати поняття **носія** $S(A)$ розпливчатої множини A , який означають як таку множину, що

$$[x \in S(A) \subseteq X] \Leftrightarrow [\mu_A(x) > 0],$$

тобто це множина лише таких x , які можуть належати множині A .

Розпливчата множина A називається **номінальною** тоді й тільки тоді, коли $\sup_x \mu_A(x) = 1$, а не то вона називається **субнормальною**. Непорожню субнормальну множину можна нормалізувати, розділивши $\mu_A(x)$ на $\sup_x \mu_A(x)$. У зв'язку з можливістю субнормальності варто доповнити означення нерозпливчатої множини випадком, коли $\mu_A(x) = \text{const} < 1$ для всіх $x \in S(A)$.

Рівність двох розпливчатих множин A та B можна означити умовою

$$(A = B) \Leftrightarrow [\mu_A(x) = \mu_B(x)] \text{ для всіх } x \in X.$$

Включення розпливчатої множини A в множину B означають так:

$$(A \subseteq B) \Leftrightarrow [\mu_A(x) \leq \mu_B(x)] \text{ для всіх } x \in X.$$

Наприклад, множина дуже великих чисел — підмножина множини великих чисел.

Розпливчата множина A' називається **доповненням** до розпливчатої множини A тоді й тільки тоді, коли $\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$. Наприклад, множини “високі люди” й “невисокі люди” можуть як доповнювати одна другу, якщо їх функції належності в сумі тотожно дорівнюють одиниці, так і не доповнювати в разі іншого задання цих функцій.

Перетин розпливчатих множин A та B означають співвідношенням

$$(A \cap B) \Leftrightarrow [\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}] \text{ для всіх } x \in X.$$

Об'єднанням розпливчатих множин A та B називається розпливчата множина $A \cup B$, яка задовольняє умові

$$(A \cup B) \Leftrightarrow [\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}] \text{ для всіх } x \in X.$$

У деяких застосуваннях зручно означити складені множини, які відповідають конкретним арифметичним операціям над функціями належності складових множин.

Так, **алгебричний добуток** розпливчастих множин A та B позначають як AB й означають рівністю

$$\mu_{AB}(x) = \mu_A(x)\mu_B(x), \quad x \in X;$$

алгебрична сума $A \oplus B$ відповідає рівності

$$\mu_{A \oplus B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x), \quad x \in X.$$

Говорять, що існує **розпливчате відношення** R між елементами x та y множин X та Y , якщо множина пар (x, y) , які задовольняють цьому відношенню $(x R y)$, утворює розпливчасту множину в $X \times Y$, тобто можна задати $\mu_R(x, y)$ — функцію належності (x, y) до R .

Нехай C — розпливчата множина в множині $X \times Y$ із функцією належності $\mu_C(x, y)$. Множина C називається **розкладеною** за X та Y тоді й тільки тоді, коли C можна подати як $C = A \cap B$, чи, що те саме,

$$\mu_C(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)].$$

Ми навели основні поняття, за допомогою яких побудовано теорію розпливчастих множин, щоб можна було скласти уявлення про те, як можна побудувати математичну модель спостережень, що не задовольняє аксіомам тотожності. Інакше кажучи, кожна вимірювальна шкала може бути “розмита”. Для “розмиття” шкал найменувань і порядку досить наведених вище понять; кількісні шкали потребують деяких додаткових означень.

“Найвужче місце” теорії розмитих множин — задання функцій належності. Існує кілька підходів до визначення функції $\mu_A(x)$:

1) *евристичний підхід*, коли суб’єкт сам визначає, як він розуміє ступінь приналежності; функції, задані різними людьми для однієї множини, можуть різнитися, що відображає різницю в розумінні розпливчастого терміна;

2) *статистичний підхід*, за якого $\mu_A(x)$ визначають усередненням функцій, заданих різними експертами;

3) *часткове задання* $\mu_A(x)$ *пояснювальними прикладами* й подальше довизначення всієї функції будь-яким придатним методом;

4) *інтервальне* визначення на кшталт задання песимістичної й оптимістичної меж для функції $\mu_A(x)$;

5) *кратна розпливчастість*, тобто задання $\mu_A(x)$ як розмитої множини за допомогою функції належності другого порядку $\mu_{A^2}(\mu_A(x))$.

3.4. Імовірнісний опис ситуацій. Статистичні вимірювання

Невизначеність буває різного походження. Один з її видів — невідомість — розглядає теорія пізнання. Інший вид невизначеності — розпливчастість — обговорено вище. Третій вид — випадковість.

Говорячи про випадкові явища, насамперед звертають увагу на їх непередбачуваність, протиставляють випадковість детермінованості, хаотичність — упорядкованості. Хоч таке протиставлення й має певний сенс, воно однобічне, тому що залишає в тіні той факт, що *випадковість — це вид невизначеності, який підкоряється строгій закономірності, вираженій розподілом імовірностей*. Знаючи розподіл імовірностей $p(x)$, можна відповісти на будь-яке запитання про випадкову величину: якому інтервалу належать її можливі значення (визначимо носія розподілу X — множину елементів x , для яких $p(x) > 0$); навколо якого значення розсіяно її реалізувальні значення (знайдемо параметр положення розподілу, наприклад середнє, моду чи медіану); наскільки сильно розкидані ці значення (знайдемо масштабний параметр — дисперсію чи стандартне відхилення, середній модуль різниці, ентропію); який зв'язок між різними реалізаціями (обчислимо задану міру залежності) і т. д.

Існує кілька поглядів на природу випадковості.

Відповідно до першого випадковим вважають щось таке, у чому поки що не виявлено закономірності. З пізнанням явища в ньому залишається все менше й менше випадкового. Яскравим представником такої позиції був П. Лаплас, який уважав, що випадковість не притаманна самим об'єктам, а пов'язана тільки з незнанням, у принципі переборним.

3.4. Імовірнісний опис ситуацій. Статистичні вимірювання

Протилежний погляд полягає в тому, що випадковість — об'єктивна властивість усіх явищ. Більше ста років тому О. Курно писав, що “випадковість втручається в усе, що діється на світі... світом керує випадок, чи, говорячи точніше, випадок має свою частку, і притому дуже значну, у керуванні всесвітом”.

Проміжна позиція визнає як існування цілком детермінованих явищ, так і в принципі випадкових, описуваних статистичними законами. Отже, випадковість визнають об'єктивною властивістю лише деяких явищ.

Як і будь-які експерименти, вимірювання випадкових величин і процесів потрібні для уточнення їх моделей, зняття чи зменшення невизначеності незнання. Зазвичай достатньо знати не весь розподіл, а лише якийсь із його параметрів, і тоді задача зводиться до оцінки цього параметра за спостережуваною вибіркою. Хоча це вже “вторинна” обробка даних, вимірювання вибіркового значень і обчислення оцінки в сукупності можна трактувати як вимірювання параметра. Те саме стосується й визначення за вибіркою складніших характеристик — самих розподілів, регресій, кореляцій, спектрів тощо.

Усе це дає підстави ввести поняття статистичних вимірювань і розглядати цю проблематику як самостійний розділ метрології зі своєю теорією та вимірювальною технікою.

Наголосимо ще раз, що статистичний, імовірнісний підхід пов'язаний із невизначеністю, описуваною розподілами ймовірностей. Методи статистики треба застосовувати обережно; багато експериментальних ситуацій можуть бути хаотичними, але не мати ймовірнісного характеру.

Дуже важливо також, якщо це можливо, послабити чи хоча б урахувати вплив вимірювань на спостережуваний об'єкт. Особливо це істотно в соціальних дослідженнях, спостереженнях за людьми: саме усвідомлення того, що вони є об'єктом уваги, помітно змінює їхню поведінку.

3.5. Реєстрація експериментальних даних

Результати будь-якого експерименту фіксують у тій чи іншій формі, а потім використовують для тієї мети, заради якої проводився експеримент. Іноді ці операції практично поєднані в часі, наприклад у разі автоматичного керування виробничим процесом. У деяких же видах людської практики (науковій діяльності, системному аналізі, навчальних експериментах тощо) *обробка експериментальних даних* — це окремий, самостійний етап, проміжний між етапами одержання інформації (вимірювання) та її використання (прийняття рішень і їх виконання). У такому разі вихідна інформація для обробки — **протоколи спостережень** (які також називаються **матрицями даних, експериментальними таблицями**).

Характер протоколів спостережень і методи їх обробки залежать від того, для уточнення якої моделі поставлено експеримент. Фактично обробка даних — це просте перетворення інформації до вигляду, зручного для використання, переклад відповідей природи з мови вимірювань на мову уточнюваної моделі. Наші знання можуть бути як первісними, грубими, так і глибокими, добре структурованими, хоча й такими, що потребують уточнення. Відповідні два типи моделей називають по-різному залежно від обраного аспекту: **дескриптивні** та **конструктивні, якісні** та **кількісні, декларативні** та **процедурні, класифікаційні** та **числові**.

3.5.1. Класифікаційні моделі

Класифікаційні моделі — це основні, первинні, вихідні форми знання. Упізнання навколишніх предметів — типовий приклад класифікаційних процесів у розумовій діяльності людини (і тварин). У науці пізнання також починається із зіставлення досліджуваного об'єкта з іншими, виявлення їх подібності та розбіжностей між ними. Тому протокол спостережень на класифікаційному рівні експерименту містить результати вимірювання ряду ознак X для підмножини A об'єктів, обраних із множини Γ : кожен об'єкт $a_i \in A \subseteq \Gamma$ має зна-

чення ознак $x_i = (x_{i0}, x_{i1}, \dots, x_{in}) \in \{X_0, X_1, \dots, X_n\} = X$, $i = \overline{1, N}$, де n — кількість ознак, N — кількість об'єктів у множині A . Ознаку характеризує конкретна властивість, тому іноді такий протокол називають таблицею “об’єкт — властивість”.

Спосіб обробки залежить від її мети. Часто виявляється, що задачу можна сформулювати як відшукування за спостереженим значенням ознак $x = (x_1, \dots, x_n)$ значень неспостережуваної (“цільової”) ознаки x_0 . Зазвичай цільові ознаки — це ті параметри моделі, які потрібно уточнити за експериментальними даними.

Розглянемо різні типи задач для класифікаційних моделей.

Кластеризація (пошук природного групування об’єктів). Не задано ні меж класів у просторі ознак, ні кількості класів. Потрібно визначити їх, виходячи з близькості, подібності чи розбіжностей описів об’єктів $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$. Компоненти вектора X_0 — ознаки кластера, значення яких потрібно визначити.

Класифікація (розпізнавання об’єктів). Кількість класів задано. Якщо задано також межі між класами, то маємо апріорну класифікацію; якщо межі потрібно знайти, оцінити за класифікованими прикладами, то задача називається розпізнаванням образів за навчальною вибіркою. Цільова ознака X_0 має значення в номінальній шкалі (імена класів).

Упорядкування об’єктів. Потрібно визначити відношення порядку між $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{N0}$ (чи якоюсь їх частиною) за певним критерієм переваги.

Зменшення розмірності моделі. Класифікаційні моделі як первісні й “сирі” враховують безліч припущень, які ще треба перевіряти. Так, сам список ознак X формують евристично, часто із запасом, тому він виявляється досить довгим, а головне — надлишковим, бо містить подібні та “шумливі” ознаки. Тому одна з важливих задач удосконалювання класифікаційних моделей полягає в зменшенні розмірності моделі за допомогою добору найінформативніших ознак, “склеювання” декількох ознак в одну тощо. Як впливає з практики, інформативні ознаки можуть бути різними для різних класів.

3.5.2. Числові моделі

Числові моделі мають такі відмінності від класифікаційних:

- цільові ознаки x_0 вимірюються в числових шкалах;
- числа x_0 являють собою функціонали чи функції ознакових змінних (які не обов'язково всі числові);
- у них набагато частіше враховано зв'язки змінних у часі (у класифікаційних задачах час іноді навіть називають “забутою” змінною).

Числові моделі можуть задавати зв'язок між змінними як у параметризованій формі (тобто у вигляді функції зі скінченною кількістю параметрів), так і в непараметризованій (у вигляді функціонала).

Наведемо типові задачі для числових моделей.

Непрямі вимірювання (оцінка параметра). Потрібно знайти значення x_0 за заданою множиною $\{x_{ij}\}$. На відміну від класифікації x_0 вимірюють не в номінальній, а в числовій шкалі. Якщо $\{x_{ij}\}$ визначені до якогось моменту t_0 , а x_0 потрібно оцінити для $t > t_0$, то задача називається **прогнозуванням**. (Прогнозування має сенс і в задачі класифікації: наприклад, рання діагностика захворювання.)

Пошук екстремуму (планування експерименту). Можна покроково змінювати величини $\{x_{ij}(t_k)\}$, $t_k = t_0 + k\Delta t$, $k = 0, 1, 2, \dots$, так, щоб зрештою одержати екстремальне значення цільової ознаки x_0 .

3.5.3. Особливості протоколів спостережень

Велика розмірність. У багатьох дослідженнях кількість об'єктів N і кількість ознак n великі, тому добуток $N \times n$ має декілька десяткових порядків. Урахування часу призводить до ще більшого зростання розмірності блоку даних. Нині застосування ЕОМ істотно розширює кількісні можливості обробки даних, але “прокляття розмірності” залишається серйозною проблемою.

Різнотипність даних. Різні ознаки можна вимірювати в різних шкалах. Багато алгоритмів призначено для обробки однотипних змінних, тому часто потрібно зводити різнотипні дані до однієї

шкали. Ясно, що найправильніша стратегія полягає в розробці алгоритмів, спеціально побудованих так, щоб можна було обробляти різнотипні дані, не вносячи до протоколу жодних змін, не пов'язаних з експериментом.

Пропущені значення. Незаповнена комірка таблиці даних — не такий уже рідкісний випадок, особливо якщо експеримент виконано не в лабораторних, а в природних умовах. Вилучити з таблиці рядок і стовпчик, на перетині яких лежить порожня комірка, — далеко не завжди прийнятне рішення. Можна, використовуючи надлишковість таблиці, якось відновити пропущені значення, а потім обробляти таблицю так, начебто їх і не було. Однак критерій відновлення й мета обробки мають бути узгоджені, тому немає універсального способу відновлення пропусків. Хоча такий метод часто цілком прийнятний, перспективним здається конструювання алгоритмів обробки, які дають змогу використовувати таблиці “з проблемами” без їх попереднього заповнення.

Защумленість. Досить часто результат вимірювання, занесений до протоколу, відрізняється від вимірюваного значення на якусь випадкову величину. Статистичні властивості цієї додаткової перешкоди можуть не залежати від вимірюваної величини, і тоді перешкоду називають **адитивним шумом**, а не то — неадитивною, чи залежною. Усі ці варіанти потрібно по-різному враховувати під час обробки.

Спотворення, відхилення від припущень. Починаючи обробляти протокол спостережень, ми завжди виходимо з певних припущень про природу величин, занесених до протоколу. Будь-який спосіб обробки даних дає результати очікуваної якості тільки в тому разі, коли вони задовольняють заданим припущенням. На жаль, у ході обробки на це далеко не завжди звертають увагу.

3.6. Вимірювання як ієрархія моделей

Процес наукового пізнання можна умовно поділити на такі кроки:

- 1) визначають явище (подію), яке потрібно дослідити;
- 2) проводять спостереження;

3) на основі теорії, за допомогою якої ми намагаємося описати взаємозв'язок між досліджуваними змінними, висувають гіпотезу;

4) ставлять експеримент, щоб перевірити гіпотезу та визначити істинність вихідної теорії;

5) виконують вимірювання;

6) результати експерименту дають змогу визначити істинність або хибність теорії:

- якщо гіпотезу приймають, то вважають, що теорія правильно пояснює спостережуване явище; за допомогою положень цієї теорії роблять припущення, формулюють закони, а також визначають прогнози на майбутнє;
- якщо гіпотезу відхиляють, то потрібно сформулювати нову теорію та нову гіпотезу; виконують наступну ітерацію циклу “гіпотеза — експеримент — перевірка”.

Процес вимірювання входить до ієрархії моделей (рис. 8), за допомогою якої можна пояснити й передбачити події та явища. Ця ієрархія (послідовність моделей) дає змогу перейти від якісних спостережень до кількісних тверджень про події, об'єкти та явища. У свою чергу, за допомогою кількісних тверджень будують доведення, роблять узагальнення та прогнози, на основі яких можна вибрати якість рішення.

Запитання та завдання до розділу 3

1. Наведіть приклади пасивного й активного експерименту. Чим вони відрізняються?

2. Поясніть вираз: “Похибки вимірювань — невід’ємна властивість процесу вимірювання”.

3. Що таке вимірювання?

4. Сформулюйте аксіоми тотожності.

5. Наведіть приклади об'єктів, властивості яких можна виміряти за шкалою найменувань.

6. Які операції допустимі для даних, виміряних за шкалою найменувань?

7. Чим відрізняються шкали найменувань від порядкових шкал?

8. Сформулюйте аксіоми впорядкованості.



Рис. 8. Ієрархія моделей, використувувана в процесі вимірювання

9. Які різновиди шкал порядку ви знаєте? У чому їх особливості?
10. Назвіть допустимі операції в шкалі порядку.
11. Які розповсюджені модифіковані рангові шкали ви знаєте?
12. Що таке порядкова шкала Черчмена й Акоффа?
13. Чим відрізняється шкала інтервалів від порядкової шкали?
14. Сформулюйте аксіоми адитивності.
15. Чим характеризується шкала відношень?
16. У якому типі вимірювальних шкал існує абсолютний нуль?
17. Що таке абсолютна шкала?
18. Що таке розпливчастий опис ситуацій? Чим він відрізняється від імовірнісного?
19. Сформулюйте означення основних операцій у теорії розпливчастих множин.
20. Що таке випадковість?
21. Якщо ми не можемо дати відповідь про результат експерименту заздалегідь, то чи завжди це означає ймовірнісну природу досліджуваного явища? Наведіть приклади.
22. У чому полягає процедура кластеризації?
23. Коли використовують класифікацію об'єктів?
24. Як зменшити розмірність моделі?
25. Що таке числові моделі?
26. Коли виникає потреба в непрямих вимірюваннях?
27. Наведіть приклади задач прогнозування.
28. Які особливості мають протоколи спостережень?
29. Якою ієрархією моделей характеризується процес вимірювання?

==== Частина II ====

Системний аналіз

Розділ 4

ВИБІР (ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ)

4.1. Поліпшення та проектування систем

4.1.1. Поліпшення систем

Поліпшенням систем називають процес, що забезпечує їх роботу згідно з очікуваннями (при цьому вважають, що визначено проект

системи). Це виявлення причин відхилень від заданих норм роботи системи чи можливостей її поліпшення, тобто отримання результатів, які найбільше відповідали б цілям проекту. Проект потребує поліпшення за таких умов:

- 1) якщо система не відповідає поставленим цілям;
- 2) не забезпечує прогнозування результатів;
- 3) не працює так, як належить.

Для поліпшення роботи системи потрібно виявити причини несподіваних відхилень. При цьому мають бути план, специфікації, стандарт або норми, що визначають, як має працювати система, і з якими можна порівняти її реальні характеристики.

Коли потрібно поліпшити систему, слід перш за все чітко сформулювати задачу, тобто обмежити сферу дослідження; точно описати характер системи та виявити, з яких підсистем вона складається, і за допомогою аналізу шукати їх зв'язки, які допоможуть дати відповіді на поставлені запитання.

Виходячи з відомих фактів, за допомогою дедуктивного методу можна зробити деякі попередні висновки. Процес поліпшення систем складається з таких кроків:

- 1) визначають задачу, систему та її складові підсистеми;
- 2) спостереженням визначають реальні стани, умови роботи чи поведінка систем;
- 3) порівнюють реальні й очікувані умови роботи систем, щоб визначити степінь відхилення;
- 4) у межах підсистем будують гіпотези відносно причин цього відхилення;
- 5) із наведених фактів методом дедукції роблять висновки; велику проблему за допомогою редукції розбивають на підпроблеми.

Поліпшення систем у цьому разі виконують методом **інтроспекції**, тобто ми йдемо всередину від системи до її елементів, виходячи з того, що потрібно розв'язувати проблеми в межах самої системи. Поліпшення систем ґрунтується на тому, що всі відхилення спричинені дефектами в елементах систем, і їх можна пояснити специфічними причинами. При цьому не ставлять під сумнів функцію, призначення, структуру та взаємодію з іншими системами. Це основний недолік поліпшення систем.

4.1.2. Проектування систем. Системний підхід

Системний підхід — це методологія проектування систем. У разі його застосування ставлять під сумнів сам характер системи та її роль у межах ширшої системи. Перше питання, що виникає в системному підході, — це мета існування системи. Потрібно знайти розбіжності між даною системою та зовнішніми системами, до яких вона входить або з якими пов'язана. Системний підхід у цьому разі називають екстраспективним, оскільки аналіз спрямовано від системи до її оточення (зовні), від частинного до загального, а проект найкращої системи визначають методами індукції та синтезу.

Проектування системи в цілому означає створення оптимальної конфігурації (структури) системи.

Системний підхід — це принцип дослідження, за якого розглядають систему загалом, а не окремі її підсистеми. Його завдання — оптимізація системи в цілому, а не підвищення ефективності її складових підсистем.

На відміну від методології змін, яку називають поліпшенням систем, системний підхід — це методологія проектування, що ґрунтується на таких положеннях.

1. Проблему визначають з урахуванням взаємозв'язку з великими системами, до яких уходить розглядувана система та з якими вона пов'язана спільністю цілей.

2. Цілі системи зазвичай визначають не в межах підсистем; їх слід розглядати у зв'язку з більшими системами чи системою в цілому.

3. Наявні проекти слід оцінювати за обсягом передбачених витрат або ступенем відхилення системи від оптимального проекту.

4. Оптимальний проект зазвичай неможливо оцінити за обсягом невеликих змін у наявні прийнятні форми. Він ґрунтується на плануванні, оцінці та прийнятті рішень, пов'язаних із новими та позитивними змінами для системи в цілому.

5. Системний підхід ґрунтується на таких методах роздумів, як індукція та синтез, що відрізняються від методів дедукції, аналізу та редукції, використовуваних для поліпшення систем.

6. Планування — це процес, у якому планувальник перебирає на себе роль лідера, а не веденого. Він має пропонувати рішення, які

пом'якшують або навіть усувають, а не посилюють небажані впливи та тенденції попередніх проектів систем.

4.1.3. Реаліст проти ідеаліста

Реаліст — це планувальник, який підходить до проектування практично. Для нього планування нерозривно пов'язане з визначенням того, якими засобами його можна виконати. Для реаліста план має значення лише тоді, коли його можна реалізувати. З погляду **ідеаліста**, план не має бути пов'язаний з його практичним утіленням. Для нього реалістичність плану закладено в самому плані. Тому ідеаліст не прагне, щоб складання плану було пов'язане з дійсністю.

Чимало планів складено за столом планувальників-ідеалістів. Нереалізовані проекти не обов'язково погані. Швидше за все, їх склали ідеалісти, котрі вважають, що потрібно розглядати всю систему в цілому й що план має стосуватися моменту часу, який ще не настав, але настане в майбутньому. Чи можемо ми сказати, що ідеаліст проникливіший, ніж реаліст? Реаліст — це виконавець; він прагне здійснити частинні проекти та задуми. Для нього план фактично ніколи не закінчується. Однак ми повинні прийняти кінцевий варіант проекту та невідкладно знайти практичне застосування нашим знанням, а не то ми ніколи не розпочнемо будь-які дії. Для ідеаліста план — це проект майбутнього, завжди незавершений і не повністю готовий до застосування. Нам хотілося б застерегти реаліста від небезпеки, яку містить у собі субоптимізація, але ми наділимо увагою й ідеаліста, який завжди відкладає виконання.

Реаліст завжди дає відносну оцінку чому-небудь. Те, що вважають найкориснішим сьогодні, може не бути таким завтра. Для ідеаліста, навпаки, поняття найбільшої корисності абсолютне й незмінне, воно являє собою все найкраще та мудре. Неможливість довести його існування примушує реаліста, який прагне діяльності, прийняти не таке абсолютне поняття корисності, яке ґрунтується на реалізмі систем “людина — машина”, що вже існують.

Ідеаліст не приймає теорію, поки передумови, на яких її побудовано, не будуть коректно доведені. Помилкові припущення можуть призвести до неправильної теорії. Для позитивістів, якими можна

вважати й реаліста, важливо знати, як працює теорія. Перевірка правильності припущень для них — другорядна справа. Так, реаліст не вважає за потрібне перевіряти правильність передумов проекту, поки проект діє та виконує свої функції. Крім того, реаліст акцентує свою увагу на діяльності, що передує теорії. Він зосереджує зусилля на виконанні та розглядає визначення точності фундаментальних припущень як розкіш, яку він не завжди може собі дозволити.

Розглядаючи ці відмінності між планувальником-реалістом і планувальником-ідеалістом, можна провести межу між тим, що належить технічним наукам, і тим, що належить філософії. Технічні науки торкаються питань, пов'язаних з інструментами, методами та підходами, використовуваними в роботі. Філософія розглядає передумови та припущення, що лежать в основі теорій і діяльності. Підхід реаліста до діяльності, використання ним фактів, його прагнення до втілення ідей показує, що реаліст застосовує більш окреслений підхід до розв'язання проблем, ніж ідеаліст. Характерна особливість ідеаліста — його прагнення досліджувати всю систему в цілому, її складові частини у зв'язку зі всією системою та на основі цього аналізувати наявні факти. Його вирізняють також здатність до абстрактного мислення, прагнення отримати абсолютні закони та доводити коректність припущень, а також передбачення майбутнього. Він ніколи не задоволений тим, що має кінцеве рішення.

Позитивні якості реаліста й ідеаліста добре охарактеризував У. Черчмен: “Ми... бачимо, що реаліст має найкращі прикладні здібності, навіть якщо його теорія неправильна, ідеаліст же — чудовий теоретик і поганий прикладник” [166]. Це твердження наводить нас на думку, що ми маємо бути водночас й ідеалістами, і реалістами. Ми повинні бути реалістами для того, щоб завжди закінчувати почате. Однак це не звільняє нас від обов'язку глибше обґрунтовувати наші дії, для чого потрібно досліджувати не лише складові частини системи, але й усю систему в цілому, її задачі та цілі. Зокрема, щоб виконати певні кроки, важливі для системи в цілому, ми повинні не просто вивчити характеристики цієї системи, а й визначити її завдання на тривалий період часу. План реально існує лише тоді, коли його використовують практично. Однак частинний план (для окремих компонентів системи) може призвести до великих бід,

якщо його не узгоджено з довгостроковими планами всієї системи в цілому. Завдання на найближчий час мають відповідати завданням на тривалий період. План на найближче майбутнє має підготувати виконання віддаленіших завдань. Неможливо судити про цілі планувальника, виходячи з початкових результатів. Це недоцільно й недалекоглядно.

У. Черчмен порівнює “незначну роботу та дуже важливу”, що схоже з розглянутими поняттями реаліста й ідеаліста. Реаліст — це спеціаліст-прикладник, який утілює грандіозний проєкт ідеаліста. Останній же — “герой”, який прагне отримати головні (важливі) рішення на рівні всієї системи, у що перший вносить лише незначний вклад.

4.2. Різноманіття задач вибору

Основна мета курсу системного аналізу — розкрити системність будь-якої цілеспрямованої діяльності. Для цього потрібно побудувати систему моделей, за допомогою яких можна узагальнювати, передавати й удосконалювати досвід такої діяльності. У попередніх темах ми вже виділили деякі з операцій, що входять у будь-яку цілеспрямовану діяльність: моделювання, перенесення інформації в часі та просторі, одержання нової інформації. Потрібно скласти ще досить великий перелік дій, з яких складається будь-яка успішна діяльність, і тільки після цього можна почати обговорення її структури та принципів організації. У цій темі розглянемо ще одну операцію, яка обов’язково входить до цілеспрямованих процесів, — вибір.

4.2.1. Вибір як реалізація мети

Вибір — це дія, що надає діяльності цілеспрямованості. Саме вибір реалізує підпорядкованість усієї діяльності поставленій меті чи сукупності цілей. Рано чи пізно настає момент, коли подальші дії можуть бути різними, такими, що зумовлюють різні результати, а реалізувати можна тільки одну дію, до того ж уже (зазвичай) неможливо повернутися до ситуації, яка була в цей момент.

Здатність зробити правильний вибір за таких умов — дуже цінна якість, притаманна людям різною мірою. Великі полководці, видатні політики, геніальні інженери та вчені, талановиті адміністратори відрізняються від своїх колег або конкурентів насамперед умінням приймати кращі рішення, робити кращий вибір.

Задачі вибору надзвичайно різноманітні, різні й методи їх розв'язання. Насамперед уведемо поняття, загальні для всіх задач вибору.

Ухвалення рішення — це дія над множиною альтернатив, у результаті якої отримують підмножину обраних альтернатив. Можна зменшити множину альтернатив, якщо є спосіб порівняння альтернатив між собою та визначення найкращих. Кожен такий спосіб називають **критерієм переваги**. За такого опису вибору вважають само собою зрозумілими, уже пройденими, два надзвичайно важливі етапи:

- 1) породження множини альтернатив, з яких потрібно вибирати;
- 2) визначення цілей, заради досягнення яких роблять вибір.

Поки будемо вважати, що вихідну множину альтернатив, з яких потрібно вибрати найкращі, уже задано, і цілі визначено настільки детально, що вже існують критерії оцінки й порівняння будь-яких альтернатив.

4.2.2. Множинність задач вибору

Навіть у такій спрощеній постановці проблема вибору нетривіальна, і можуть бути істотно різні її математичні формулювання. Річ у тім, що кожен компонент ситуації вибору можна реалізувати в якісно різних варіантах. Зазначимо основні з них:

- *множина альтернатив* може бути скінченною, зліченною чи континуальною;
- *оцінку альтернативи* можна виконувати за одним або декількома критеріями, які, у свою чергу, можуть мати як кількісний, так і якісний характер;
- *режим вибору* може бути однократним (разовим) чи повторюваним, що дає змогу навчатися на досвіді;
- *наслідок вибору* може бути точно відомий (*вибір в умовах визначеності*), мати ймовірнісний характер, коли відомі ймовірності

можливих результатів після зробленого вибору (*вибір в умовах ризику*), або неоднозначний, коли не можна вводити ймовірності (*вибір в умовах невизначеності*);

- *відповідальність за вибір* може бути односторонньою (в окремому випадку — індивідуальною) чи багатосторонньою; відповідно розрізняють індивідуальний і груповий вибір;

- *ступінь узгодженості* цілей у разі багатостороннього вибору може варіюватися від повного збігу інтересів сторін (*кооперативний вибір*) до їх протилежності (*вибір у конфліктній ситуації*). Можливі також проміжні випадки, наприклад *компромісний вибір*, *коаліційний*, *вибір в умовах конфлікту*, *що наростає*, тощо.

4.3. Мови опису вибору

4.3.1. Критеріальна мова опису вибору

Дотепер створено три основні мови опису вибору. Найпростіша, найбільш розвинена (і, може, тому найуживаніша в застосуваннях) **критеріальна мова**. Ця назва пов'язана з основним припущенням, яке полягає в тому, що кожну окремо взятую альтернативу можна оцінити конкретним числом (значенням критерію), і порівняння альтернатив зводиться до порівняння відповідних їм чисел.

Нехай x — якась альтернатива з множини X . Уважають, що для всіх $x \in X$ можна задати функцію $q(x)$, яка називається **критерієм** (**критерієм якості**, **цільовою функцією**, **функцією переваги**, **функцією корисності** тощо) і має таку властивість: якщо альтернатива x_1 переважає альтернативу x_2 (позначають $x_1 > x_2$), то $q(x_1) > q(x_2)$, і навпаки.

Вибір як максимізація критерію. Якщо припустити, що вибір будь-якої альтернативи зумовлює однозначно відомі наслідки (тобто вважати, що вибір виконується в умовах визначеності) і заданий критерій $q(x)$ чисельно виражає оцінку цих наслідків, то найкраща альтернатива x^* — природно, така, за якої критерій набуває свого найбільшого значення:

$$x^* = \arg \max_{x \in X} q(x).$$

Задача відшукування x^* , проста за постановкою, часто виявляється складною для розв'язання, оскільки метод її розв'язання (та й сама можливість) залежить як від характеру множини X (розмірності вектора x і типу множини X — яка вона: скінченна, злічenna чи континуальна), так і від характеру критерію ($q(x)$ — функція чи функціонал і яка чи який саме).

Відшукати найкращу альтернативу дуже складно, тому що на практиці оцінювати будь-який варіант одним числом — це зазвичай неприйнятне спрощення. Щоб повніше розглянути альтернативи, потрібно оцінювати їх не за одним, а за декількома критеріями, що якісно різняться між собою. Наприклад, вибираючи конструкцію літака, проєктувальники мають урахувати безліч критеріїв: технічних (висотність, швидкість, маневреність, вантажопідйомність, тривалість польоту тощо), технологічних (пов'язаних із майбутнім процесом серійного виготовлення літаків), економічних (що визначають витрати на виробництво, експлуатацію й обслуговування машин, їх конкурентноспроможність), соціальних (зокрема, рівень шуму, забруднення атмосфери), ергономічних (умови роботи екіпажу, рівень комфорту для пасажирів) та ін. Навіть у повсякденному житті, вибираючи щось, ми майже ніколи не використовуємо єдиний критерій: згадайте хоча б утруднення під час вибору подарунка до дня народження чи місця для стоянки в турпоході.

Отже, нехай для оцінювання альтернатив використано кілька критеріїв $q_i(x)$, $i = 1, \dots, p$. Теоретично можна уявити собі ситуацію, коли в множині X виявиться одна альтернатива, яка має найбільші значення всіх p критеріїв; вона найкраща. Однак на практиці таких випадків майже не буває, і виникає питання, як же тоді виконувати вибір.

Зведення багатокритеріальної задачі до однокритеріальної. Розглянемо найбільш застосовувані способи розв'язування багатокритеріальних задач. Перший спосіб полягає в тому, щоб звести багатокритеріальну задачу до однокритеріальної. Це означає, що потрібно ввести **суперкритерій**, тобто скалярну функцію векторного аргументу

$$q_0(x) = q_0(q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x)).$$

Суперкритерій дає змогу впорядкувати альтернативи за значеннями функції q_0 , виділивши тим самим найкращу (щодо цього критерію). Вигляд функції q_0 залежить від того, як ми уявляємо собі внесок кожного критерію в суперкритерій; зазвичай використовують адитивні чи мультиплікативні функції:

$$q_0 = \sum_{i=1}^p \frac{\alpha_i q_i}{s_i};$$
$$1 - q_0 = \prod_{i=1}^p \left(1 - \frac{\beta_i q_i}{s_i}\right).$$

Коефіцієнти s_i забезпечують, по-перше, безрозмірність числа $\frac{q_i}{s_i}$ (частки критерію можуть мати різну розмірність, і тоді деякі арифметичні операції над ними, наприклад додавання, не мають змісту) і, по-друге, коли це потрібно — виконання умови $\frac{\beta_i q_i}{s_i} \leq 1$. Коефіцієнти α_i та β_i відображають відносний внесок частинних критеріїв у суперкритерій.

Отже, у цьому способі задача зводиться до максимізації суперкритерію:

$$x^* = \arg \max_{x \in X} q_0(q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x)).$$

Очевидні переваги об'єднання декількох критеріїв в один суперкритерій пов'язані з низкою труднощів і недоліків, які потрібно враховувати в разі застосування цього методу. Попри труднощі побудови самої функції й обчислювальні труднощі її максимізації, слід звернути увагу на такий дуже важливий момент. Упорядкування точок у багатовимірному просторі в принципі не може бути однозначним; воно цілком визначається виглядом упорядкувальної функції. Суперкритерій відіграє роль такої функції, і навіть незначна його зміна може спричинити те, що оптимальна в новому розумінні альтернатива виявиться дуже сильно відмінною від старої.

Умовна максимізація. Недоліки згортання декількох критеріїв змушують шукати інші підходи до розв'язання задач багатокритеріального вибору. Розглянемо тепер другий спосіб їх розв'язання. Він

полягає в іншому, ніж у разі згортання, використанні того, що частинні критерії зазвичай нерівнозначні між собою (одні з них важливіші, ніж інші). Найбільш явне вираження цієї ідеї полягає у виділенні основного критерію та розгляді інших як додаткових, супутніх. Така розбіжність критеріїв дає змогу сформулювати задачу вибору як визначення умовного екстремуму основного критерію

$$x^* = \arg \left\{ \max_{x \in X} q_1(x) \mid q_i(x) = C_i, i = 2, 3, \dots, p \right\}$$

за умови, що додаткові критерії залишаються на заданих їм рівнях.

У деяких задачах можливо чи навіть потрібно задавати обмеження на супутні критерії не так жорстко. Наприклад, якщо супутній критерій характеризує вартість витрат, то замість фіксації витрат розумніше задавати їх верхній рівень, тобто формулювати задачу з обмеженнями типу нерівностей:

$$x^* = \arg \left\{ \max_{x \in X} q_1(x) \mid q_i(x) \leq C_i, i = 2, 3, \dots, p \right\}.$$

У межах того самого підходу (з обмеженнями на критерії, різноважливими критеріями) можливі й інші варіанти. У попередніх двох варіантах розбіжність між основним і додатковим критеріями занадто велика. Іншу постановку задачі дає **метод поступок**.

Нехай частинні критерії впорядковано за спаданням їх важливості. Візьмемо перший із них і знайдемо найкращу за цим критерієм альтернативу. Потім визначимо “поступку”, тобто величину, на яку ми згодні зменшити досягнуте значення найважливішого критерію, щоб спробувати збільшити, наскільки можливо, значення наступного за важливістю критерію, і т. д.

Пошук альтернативи із заданими властивостями. Третій спосіб багатокритеріального вибору застосовний тоді, коли заздалегідь можна знайти значення частинних критеріїв (або їх межі), і задача полягає в тому, щоб знайти альтернативу, яка задовольняє цим вимогам, або, виявивши, що такої альтернативи в множині X немає, знайти в X таку альтернативу, яка найбільше відповідає поставленим цілям. Характеристики розв’язку такої задачі залежать

від багатьох факторів. Обговоримо деякі принципові моменти цього підходу.

Зручно задавати бажані значення \bar{q}_i критеріїв як точно, так і у вигляді верхніх або нижніх меж; задані значення \bar{q}_i іноді називають **рівнями домагань**, а точку їх перетину в p -вимірному просторі критеріїв — **метою**, **опорною точкою**, **ідеальною точкою**. Оскільки рівні домагань задають без точного знання структури множини X у просторі частинних критеріїв, цільова точка може бути як усередині, так і поза X (досяжна чи недосяжна мета).

Тепер ідея оптимізації полягає в тому, щоб, почавши з будь-якої альтернативи, наблизитися до x^* за якоюсь траєкторією в просторі X . Цього можна досягти за допомогою введення числової міри близькості між наступною альтернативою x і метою x^* , тобто між векторами $q(x) = (q_1(x), \dots, q_p(x))$ і $\bar{q}(x) = (\bar{q}_1(x), \dots, \bar{q}_p(x))$. Можна по-різному кількісно описати цю близькість. Наприклад, використовують відстані типу

$$d_k(q, \bar{q}) = \left(\sum_{i=1}^p w_i |q_i(x) - \bar{q}_i|^k \right)^{1/k}$$

або

$$S(q, \bar{q}) = \min_i \alpha_i (q_i - \bar{q}_i) + \alpha_{p+1} \sum_{i=1}^p \alpha_i (q_i - \bar{q}_i),$$

де $q_i \geq \bar{q}_i$, а α_i — коефіцієнти, які зводять доданки до однакової розмірності й водночас ураховують рівноважливність критеріїв; α_{p+1} виражає наше ставлення до того, що важливіше — зменшувати близькість кожного з частинних критеріїв до мети чи сумарну близькість усіх критеріїв до цільових значень. Якщо частина рівнів домагання обмежує критерії знизу ($q_i \geq \bar{q}_i$, $i = 1, \dots, p'$), частина обмежує їх зверху ($q_i \leq \bar{q}_i$, $i = p' + 1, \dots, p''$), а інші задають жорстко ($q_i = \bar{q}_i$, $i = p'' + 1, \dots, p$), то функцію $S(q, \bar{q})$ модифікують:

$$S(q, \bar{q}) = \min_i Z(q_i - \bar{q}_i) + \alpha_{p+1} \sum_{i=1}^p Z(q_i - \bar{q}_i),$$

де

$$Z(q_i - \bar{q}_i) = \begin{cases} \alpha_i(q_i - \bar{q}_i), & \text{якщо } 1 \leq i \leq p', \\ \alpha_i(\bar{q}_i - q_i), & \text{якщо } p' + 1 \leq i \leq p'', \\ \alpha_i \min[(q_i - \bar{q}_i), (\bar{q}_i - q_i)], & \text{якщо } p'' + 1 \leq i \leq p. \end{cases}$$

Відшукання паретівської множини. Четвертий спосіб багатокритеріального вибору, який можна повністю формалізувати, полягає у відмові від виокремлення єдиної “найкращої” альтернативи та дотримуванні угоди про те, що перевагу одній альтернативі перед другою можна віддавати тільки тоді, коли перша за всіма критеріями краща, ніж друга. Якщо ж перевага хоча б за одним критерієм не збігається з перевагою за іншим, то такі альтернативи визнають непорівнянними. У результаті попарного порівняння альтернатив усі гірші за всіма критеріями альтернативи відкидають, а ті, що залишилися, — непорівнянні між собою (недомінантні) — приймають. Якщо всі максимально досяжні значення частинних критеріїв не належать одній і тій самій альтернативі, то прийняті альтернативи утворюють **множину Парето**, і на цьому вибір закінчується.

Ми обговорили найуживаніші способи опису вибору в термінах критеріальної мови. Можливі й інші постановки задач цією мовою; наша мета полягала в тому, щоб дати лише загальне уявлення про їх різноманіття. Для наочності та полегшення запам'ятовування наведемо схему сукупності викладених способів (рис. 9).

4.3.2. Опис вибору мовою бінарних відношень

Вибір можна описувати також іншим, загальнішим способом — за допомогою **мови бінарних відношень**. Її більша порівняно з критеріальною мовою загальність ґрунтується на врахуванні того, що в реальності часто важко чи неможливо оцінити окремо взятую альтернативу; однак якщо розглядати її не окремо, а в парі з іншою альтернативою, то можна зазначити, яка з них краща.

Отже, основні припущення мови бінарних відношень такі:

- окрему альтернативу не оцінюють, тобто не вводять критеріальну функцію;

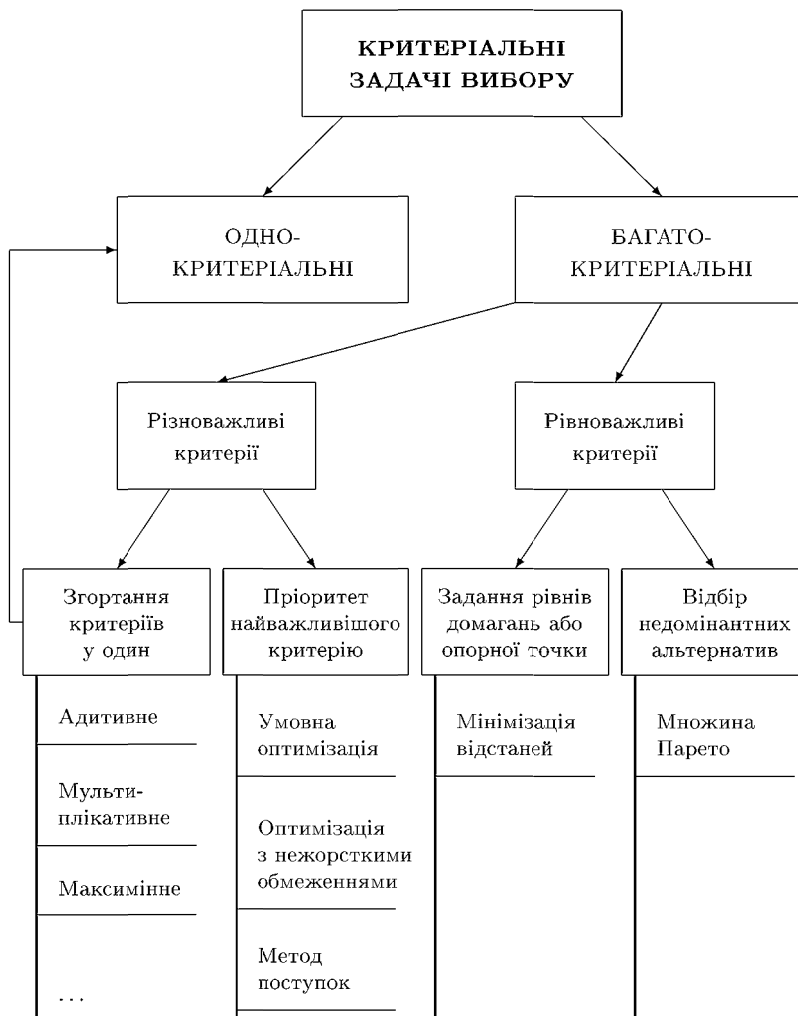


Рис. 9. Класифікація задач вибору та способів їх розв'язання в разі їх опису критеріальною мовою

- для кожної пари альтернатив (x, y) якимось можна виявити, що одна з них переважає іншу або вони рівноцінні чи непорівнянні (найчастіше останні два поняття ототожнюють);
- відношення переваги всередині будь-якої пари альтернатив не залежить від інших альтернатив, пропонованих для вибору.

Бінарне відношення R на множині X означають як певну підмножину впорядкованих пар (x, y) . Зручно використовувати позначення $x R y$, якщо x перебуває у відношенні R з y , а не то $x \bar{R} y$. Множина всіх пар $\{(x, y) : x, y \in X\}$ називається **повним (універсальним) бінарним відношенням**. Оскільки в загальному випадку не всі можливі пари (x, y) задовольняють умовам, які накладає відношення R , бінарне відношення — це підмножина повного бінарного відношення, тобто $R \subseteq X \times X$.

Задати відношення — це значить тим чи іншим способом зазначити всі пари (x, y) , для яких виконується відношення R .

Способи задання бінарних відношень. Існує чотири різні способи задання відношень (рис. 10); кожен із них має переваги для різних характеристик множини X .



Рис. 10. Способи задання вибору мовою бінарних відношень

Перший, очевидний, спосіб полягає в *безпосередньому переліченні таких пар*. Ясно, що він прийнятний лише в разі скінченної множини X .

Другий зручний спосіб задання відношення R на скінченній множині — *матричний*. Усі елементи нумерують, і матрицю відношення R можна задати її елементами:

$$a_{ij}(R) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x_i R x_j, \\ 0, & \text{якщо } x_i \bar{R} x_j \end{cases}$$

для всіх i та j . Відомий приклад такого задання відношень — турнірні таблиці (якщо нічий та програші позначити нулями, то матриця зображує відношення “ x_i — переможець x_j ”).

Третій спосіб — задання відношення *графом*. Вершинам графа $G(R)$ ставлять у відповідність (прономеровані) елементи множини X , і якщо $x_i R x_j$, то від вершини x_i проводять напрямлену дугу до вершини x_j ; якщо ж $x_i \bar{R} x_j$, то дуги немає.

Для визначення відношень на нескінченних множинах застосовують четвертий спосіб — задання їх *перетинами*. Множина

$$R^+(x) = \{y \in X \mid (y, x) \in R\}$$

називається **верхнім перетином** відношення R , а множина

$$R^-(x) = \{y \in X \mid (x, y) \in R\} —$$

нижнім перетином. Інакше кажучи, верхній перетин — це множина всіх $y \in X$, котрі перебувають у відношенні $y R x$ із заданим елементом $x \in X$, а нижній перетин — множина всіх $y \in X$, з якими заданий елемент x перебуває у відношенні R . Відношення однозначно визначається одним зі своїх перетинів.

Відношення еквівалентності, порядку та домінування. Для теорії вибору особливе значення серед усіх бінарних відношень мають ті, що відповідають перевазі однієї альтернативи над іншою чи неможливості віддати перевагу одній із двох альтернатив. Ці відношення можна задати за допомогою строго обумовлених відношень еквівалентності, порядку та домінування. Для їх означення нам знадобляться деякі властивості відношень узагалі.

Бінарне відношення R на множині X називається:

- **рефлексивним**, якщо $x R x$ для кожного $x \in X$;

- **антирефлексивним**, якщо $x \bar{R} x$ для кожного $x \in X$ (тобто R може виконуватися тільки для різних елементів);
- **симетричним**, якщо з $x R y$ випливає $y R x$ для всіх $x, y \in X$;
- **асиметричним**, якщо з $x R y$ випливає $y \bar{R} x$ для всіх $x, y \in X$ (ясно, що асиметричне відношення R антирефлексивне);
- **антисиметричним**, якщо для всіх $x, y \in X$ з $x R y$ та $y R x$ випливає $x = y$;
- **транзитивним**, якщо для всіх $x, y, z \in X$ з $x R y$ та $y R z$ випливає $x R z$;
- **негативно транзитивним**, якщо відношення \bar{R} транзитивне;
- **сильно транзитивним**, якщо відношення R водночас транзитивне та негативно транзитивне.

Тепер можна охарактеризувати відношення, використовувані в теорії вибору.

Відношення R на множині X називається **відношенням еквівалентності** (позначення “ \sim ”), якщо воно рефлексивне, симетричне та транзитивне. Задання відношення еквівалентності рівносильне розбиттю множини X на класи еквівалентних елементів, що не перетинаються ($X = \bigcup_i X_i$, $X_i \cap X_j = \emptyset$ для $i \neq j$): $x \sim y$ тоді й тільки тоді, коли $x, y \in X_i$ (тобто якщо x та y належать одному **класу еквівалентності**).

Відношенням нестрогого порядку (позначення “ \leq ”) називається рефлексивне, антисиметричне та транзитивне відношення, а **відношенням строгого порядку** (позначення “ $<$ ”) — антирефлексивне, асиметричне та транзитивне. Відношення нестрогого порядку можна розглядати як об’єднання відношень “ $<$ ” та “ \sim ”.

Нарешті, **відношенням домінування** називається антирефлексивне й антисиметричне відношення. Говорять, що “ x домінує над y ” (позначається $x \succ y$), коли x у якомусь розумінні переважає y . (Очевидно, строгий порядок — окремий випадок домінування, коли виконується ще й транзитивність.)

У разі скінченних множин дуже зручно знаходити найкращі альтернативи за допомогою графа переваг, стрілки якого спрямовані в бік менш переважної альтернативи (рис. 11). Виділивши вершини графа, з яких стрілки тільки виходять (альтернативи 6 і 10), ми

знаходимо домінуючі (найкращі) альтернативи. Можна показати, що якщо граф сильно транзитивний (тобто транзитивний за обома відношеннями “є стрілки” та “немає стрілок”) й антирефлексивний (немає петель), то описуваний вибір фактично однокритеріальний. Інші типи графів описують інші ситуації вибору.

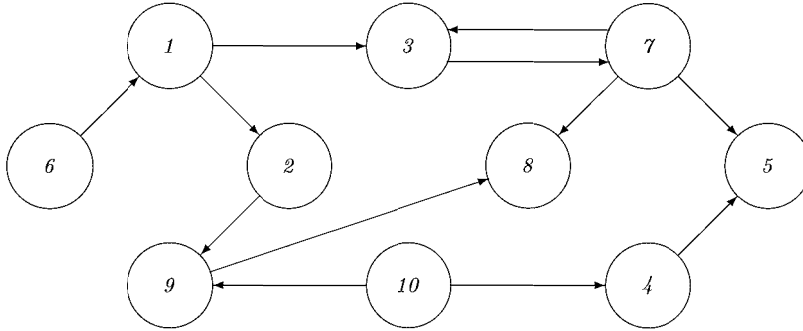


Рис. 11. Приклад графа переваг

У загальному випадку виділяти найкращі альтернативи можна за допомогою поняття **оптимальності за відношенням R** , яке дає змогу вкладати різний зміст у поняття “найкращий” (задаючи різні відношення R). Елемент $x \in X$ називається **мажорантою за відношенням R на X** , якщо для всіх $y \in X$ виконується умова $y \bar{R} x$. Множина $X_+(R)$ усіх мажорант називається **множиною R -оптимальних елементів**.

Про оцифрування порядкових шкал. Обговоримо ситуацію, що виникла під час опису вибору мовою бінарних відношень у результаті створення теорії корисності. П. Фішберн строго довів теорему, зміст якої досить ясний: *якщо множина X скінченна та між елементами є відношення строгого порядку, то можна побудувати таку дійсну функцію $u(x)$ на X , для якої з $x \prec y$ випливає $u(x) < u(y)$.*

Функція $u(x)$ називається **функцією корисності**. Зрозуміло, що вона не єдина: довільне монотонне перетворення зберігає її власти-

вість упорядкування. Цей результат потім було узагальнено на зліченні та континуальні множини X , на нестрогий порядок і для багатокритеріального вибору (адитивні функції корисності). Означення функції корисності дає змогу перейти від мови бінарних відношень до критеріальної мови, узявши $u(x)$ як критеріальну функцію. Було розвинено методи, за допомогою яких можна звузити клас функцій корисності (наприклад, розглядаючи ієрархічні парні переваги й підвищуючи тим самим точність визначення $u(x)$).

Складається враження, що від якісних порядкових вимірювань можна перейти до кількісних. Насправді ми тут знову стикаємося з такою ситуацією, коли оцифрування порядкової шкали не робить її числовою. Для відтворення впорядкування фіксованої попарно впорядкованої множини X , звичайно, можна скористатися числовою функцією $u(x)$; однак варто доповнити X альтернативами, які не було розглянуто під час першого впорядкування, функцію $u(x)$ потрібно буде визначати заново. Більше того, якщо два різні експерти по-різному впорядкують множину X , то можна довизначити функції корисності для кожного з них, але їх не можна чисельно порівнювати інакше як у відношенні порядку, хоча обидві вони визначені на одній і тій самій множині.

Оцифрування порядкових даних мало б сенс тоді, коли кількісну величину з якихось причин вимірюють у порядковій шкалі. Однак у багатьох застосуваннях теорії корисності ми маємо справу з вимірюваннями, які в принципі не можуть вийти з розряду порядкових.

4.3.3. Мова функцій вибору

Деякі особливості вибору зумовили побудову третьої, ще загальнішої мови його опису. По-перше, нерідко доводиться стикатися з ситуаціями, коли перевага двох альтернатив залежить від інших альтернатив. Наприклад, перевага покупця між чайником і кавоваркою може залежати від наявності в продажі кавомолки. По-друге, можливі такі ситуації, коли поняття переваги взагалі позбавлене змісту. Наприклад, стосовно множини альтернатив досить звичайні правила вибору “типового”, “середнього”, “найбільш відмінного, оригінального”, що втрачають зміст у разі двох альтернатив.

Функції вибору як математичний об'єкт. Мова функцій вибору описує вибір як операцію над довільною множиною альтернатив X , що ставить цій множині у відповідність якусь її підмножину $C(X)$: $C(X) \subseteq X$. Функція вибору як відображення сукупності множин у сукупність множин без поелементного відображення однієї множини в іншу та без відображення множин на числову вісь — це своєрідний і поки ще не повністю вивчений математичний об'єкт. Звичайно, накладаючи на функцію вибору певні вимоги, ми можемо описувати цією мовою й варіанти вибору, відображувані в попередніх мовах. Однак основна перевага нової мови — можливість розглядати складніші правила вибору. На це вказують хоча б різні кількості можливих функцій вибору та можливих графів переваги на множині n альтернатив. Кількість графів, які відрізняються тим, що в них є хоча б одна дуга чи немає жодної, дорівнює 2^{n^2} . Якщо для вибору запропоновано k з n альтернатив, то кількість функцій вибору дорівнює 2^k (кожна з альтернатив може або належати $C(X_k)$, або ні). Оскільки кількість можливих варіантів пред'явлення альтернатив дорівнює C_n^k , то загальна кількість функцій вибору дорівнює

$$\prod_{k=1}^n (2^k)^{C_n^k} = 2^{n^{2^{n-1}}}.$$

Як бачимо, розмаїтість функцій вибору набагато перевершує розмаїтість графів переваги. Крім того, можлива відмова від вибору, тобто порожній вибір $C(X_i) = \emptyset$, що також розширює множину правил вибору.

Обмеження на функції вибору. Розбіжності між класами правил вибору можна виразити через різні обмеження на той чи інший тип функції вибору. Окремі обмеження та їх комбінації дають уже відомі нам правила вибору, інші визначають нові правила, які потрібно вивчити. Наведемо деякі з таких обмежень.

- **Аксиома спадкування (C):**

$$X' \subseteq X \Rightarrow C(X') \supseteq C(X) \cap X'.$$

Її зміст зводиться до вимоги, щоб у вибір на підмножині X' увійшли

всі альтернативи з X' , які входили у вибір на X , а також, можливо, й інші (рис. 12, а).

- **Аксиома згоди (З):**

$$\bigcap_i C(X_i) \subseteq C\left(\bigcup_i X_i\right).$$

Вона означає, що у вибір з об'єднання множин мають входити альтернативи, загальні для виборів з усіх множин, і, можливо, інші альтернативи (рис. 12, б).

Виявляється, що спільне підпорядкування функції вибору аксіомам С і З дає вибір, описуваний у мові бінарних відношень.

- **Аксиома відкидання (В):**

$$C(X) \subseteq X' \subseteq X \Rightarrow C(X') = C(X).$$

Це означає, що відкидання будь-якої частини відкинутих під час вибору альтернатив не змінює вибору на множині, що залишилася (рис. 12, в); тому цю аксіому називають також **умовою незалежності від відкинутих альтернатив**.

Спільне накладення на вибір аксіом С, З та В зумовлює вибір паретівської множини.

- **Аксиома Плотта (КС):**

$$C(X_1 \cup X_2) = C(C(X_1) \cup C(X_2)).$$

Вона відображає вимоги, які накладають у разі багатоступінчастих виборів, коли вважають, що визначити чемпіона світу можна за допомогою змагань між чемпіонами країн, і результат виявиться тим самим, якщо змагатимуться не тільки чемпіони (рис. 12, г). Тому цю аксіому називають ще **умовою незалежності від шляху**. Функції вибору, які задовольняють її, називаються **квасісуматорними**.

Можна показати, що вимога КС еквівалентна спільному виконанню вимог С і В; отже, поєднання вимог КС і З теж зумовлює паретівський вибір.

- **Аксиома переваги (П):**

$$X' \subseteq X \Rightarrow C(X) \cap X' = C(X').$$

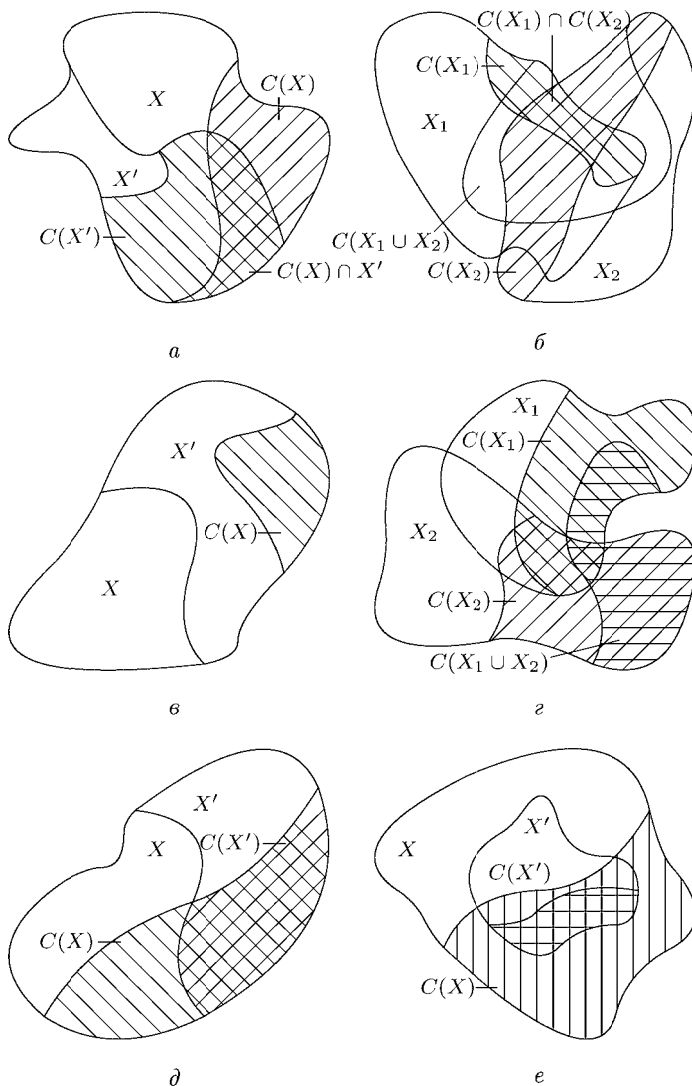


Рис. 12. Ілюстрація аксіом — обмежень на функції вибору

Згідно з нею в разі звуження множини альтернатив мають залишитися тільки ті, що входили до вибору раніше (рис. 12, *д*). Це настільки сильне обмеження, що воно еквівалентне скалярному критеріальному вибору.

Деякі з уведених аксіом можна послабляти чи підсилювати (наприклад, Π — це посилення C). Аксіому Плотта можна підсилити до **аксіоми сумарності**: $C(X_1 \cup X_2) = C(X_1) \cup C(X_2)$; можна накладати нові, незалежні вимоги (наприклад, **аксіому мультиплікаторності** $C(X_1 \cap X_2) = C(X_1) \cap C(X_2)$, **аксіому монотонності** $X_1 \subseteq X_2 \Rightarrow C(X_1) \subseteq C(X_2)$; рис. 12, *е*), одержуючи при цьому різні типи вибору. Навпаки, можна, вивчивши обмеження того чи іншого реального правила вибору, шукати властивості класу функцій вибору, який їм задовольняє.

4.4. Груповий вибір

У людському суспільстві одноособове прийняття рішень — не єдина форма вибору. “Розум — добре, а два — краще”, — говорить прислів’я щодо ситуації, коли обидва розуми з однаковими намірами намагаються знайти хороший варіант вибору.

Розглянемо цей випадок.

4.4.1. Опис групового вибору

Нехай на множині альтернатив X задано n , узагалі кажучи, різних переваг (для визначеності будемо говорити про бінарні відношення) R_1, R_2, \dots, R_n . Потрібно побудувати якесь нове відношення R , яке узгоджує індивідуальні вибори, виражає в певному розумінні “загальну думку”, і його можна розглядати як груповий вибір. Очевидно, що це відношення має бути якоюсь функцією індивідуальних виборів: $R = F(R_1, \dots, R_n)$. Різним принципам узгодження відповідають різні функції F . Теоретично вони можуть бути довільними, ураховувати не тільки індивідуальні вибори, але й інші фактори, зокрема й результат деяких випадкових подій (наприклад, кидання жереба). Основне питання полягає в тому, щоб правильно

відобразити у функції F особливості конкретного варіанта реального групового вибору.

4.4.2. Правила голосування

Один з найрозповсюдженіших принципів узгодження — **правило більшості**: прийнятою всіма вважають альтернативу, яка одержала найбільшу кількість голосів. Це правило приваблює своєю простотою та демократичністю, але має особливості, через які застосовувати його треба обережно. Насамперед, воно лише узагальнює індивідуальні переваги, і його результат — не критерій істини. Тільки подальша практика показує, правильним чи помилковим було рішення, прийняте більшістю голосів; саме голосування — лише форма узгодження подальших дій. По-друге, навіть у разі найпростішого вибору однієї з двох альтернатив легко уявити собі ситуацію, коли правило більшості не спрацьовує: наприклад, поділ голосів порівно в разі парної кількості тих, хто голосував. Це породжує варіанти: “голова має два голоси”, “відносна більшість (більше 51 %)”, “переважна більшість (близько 3/4)”, “абсолютна більшість (близько 100 %)”, “принцип однакості (консенсус, право вето)”.

За кожного з цих варіантів відмовляються від ухвалення рішення, якщо жодна з альтернатив не одержала відповідної частки голосів. Оскільки в реальному житті відмова від подальших дій після прийняття рішенням неприпустима й небажано вважати груповим вибором вибір окремої особи (“диктатора”), розробляють різні способи зменшення кількості нерозв’язних ситуацій. Наприклад, якщо два експерти мають протилежні переваги між двома варіантами a та b , то можна зробити вибір, порівнюючи “силу переваги” кожного експерта. Якщо можна ввести кількісний критерій, це зводиться до арифметичної операції, але й у разі порядкового порівняння можна оцінити “силу переваги”. У криміналістичній практиці в таких ситуаціях експертам пропонують поряд з a та b впорядкувати за перевагою ще кілька альтернатив, скажімо c , d та e . Нехай перший експерт зробив упорядкування (c, d, a, b, e) , а другий — (b, c, d, e, a) . Тоді можна дійти висновку, що ступінь переваги b порівняно з a в другого експерта більший, ніж ступінь переваги a перед b в першого, і прийняти

рішення на користь b (цей спосіб ґрунтується на низці припущень — про порівнянність інтенсивностей переваг, однакову компетентність експертів тощо, які потрібно перевіряти у відповідальних випадках).

Розглянемо основні правила голосування (зазвичай на практиці застосовують різні їх модифікації).

Правило 1 (відносної більшості). Кожен виборець вибирає лише одну альтернативу. Перемагає та з них, яка набирає найбільшу кількість голосів.

Правило 2 (Кондорсе). Перемагає альтернатива (обов'язково єдина), яка переважає будь-яку іншу за правилом відносної більшості. Недолік цього правила полягає в тому, що можлива така конфігурація переваг, за якої не буде переможця (**парадокс Кондорсе**). Така ситуація виникає тоді, коли парні порівняння за правилом відносної більшості утворюють цикл.

Правило 3 (де Борда). Кожен виборець проголошує свої переваги, ранжуючи n альтернатив від найкращої до найгіршої (байдужість заборонена). Альтернатива має 0 балів за останнє, 1 бал — за передостаннє і так далі, $n - 1$ бал — за перше місце. Перемагає альтернатива з найбільшою сумою балів.

Наведемо приклад, коли кожне з цих правил дає іншу альтернативу. Розглянемо профіль переваг для голосування 21 виборця за чотири альтернативи (табл. 3). За правилом відносної більшості перемагає альтернатива a (вісім голосів проти семи в b , шести в c , жодної в d), але водночас a — найгірша альтернатива для більшості виборців (13 голосів), для яких будь-яка інша альтернатива краща, ніж a . За правилом Кондорсе перемагає альтернатива c (вона краща, ніж альтернатива a , для 13, b — для 11 та d — для 14 виборців). За правилом де Борда перемагає альтернатива b (вона має 44 бали, альтернатива a — 14, c — 38, d — 20 балів).

У деяких випадках парадокса Кондорсе можна уникнути, модифікувавши правило Кондорсе.

Правило 4 (Копленда). Порівняємо альтернативу a з будь-якою іншою альтернативою x . Додамо до балів альтернативи a одиницю, якщо для більшості a переважає x : $a \succ x$; віднімемо одиницю, якщо для більшості x переважає a : $x \succ a$; у разі рівності голосів нічого не робимо. Підсумовуючи кількість балів для всіх альтернатив,

отримаємо **оцінку Копленда**. Перемагає альтернатива з найбільшою кількістю балів.

Таблиця 3

Профіль переваг для голосування 21 виборця за чотири альтернативи

Кількість балів	Кількість виборців			
	3	5	6	7
3	a	a	c	b
2	b	c	b	d
1	c	b	d	c
0	d	d	a	a

Як видно з табл. 3, за правилом Копленда перемагає альтернатива c (вона має 3 бали, альтернатива a — мінус 3 бали, b — 1 бал, d — мінус 1 бал).

Правило 5 (Сімпсона). Позначимо як $N(a, x)$ кількість виборців, для яких $a \succ x$. **Оцінкою Сімпсона** для альтернативи a називається число $\min_{x: x \neq a} N(a, x)$. Перемагає альтернатива з найбільшою оцінкою Сімпсона.

Для профілю переваг із табл. 3 за правилом Сімпсона перемагає альтернатива c (її оцінка Сімпсона дорівнює 11 балам, оцінка альтернативи a — 8, b — 10, а d — 0 балів).

Із наведеного вище прикладу видно, що між правилами Кондорсе та де Борда існує певна суперечність. Це питання можна дослідити детальніше, узагальнивши правило де Борда.

Правило 6 (загальне правило підрахунку балів). Зафіксуємо послідовність дійсних чисел $m_0 \leq m_1 \leq \dots \leq m_{n-1}$, $m_0 < m_{n-1}$. У разі ранжування альтернатив виборцями за останнє місце дають m_0 , за передостаннє — m_1 і так далі, за перше — m_{n-1} балів. Обирають альтернативу з найбільшою кількістю балів.

Правило де Борда та правило відносної більшості являють собою частинні випадки цього правила (для правила відносної більшості

$m_0 = m_1 = \dots = m_{n-2} < m_{n-1}$, а для правила де Борда $m_i = i$ для всіх $i = 0, 1, \dots, n - 1$).

Цікаве порівняння правила підрахунку балів і правила Кондорсе зробив П. Фішберн.

Теорема Фішберна. Існують профілі, для яких альтернативу, найкращу за правилом Кондорсе, не можна обрати ні за якого методу підрахунку балів.

4.4.3. Парадокси голосування

Ще одна особливість правила голосування — можливість відмовитися від вибору через недосягнення потрібної більшості. Здавалося б, виключивши таку можливість, можна забезпечити ухвалення рішення в будь-яких випадках. Наприклад, нехай три експерти більшістю голосів вирішують питання, яка з двох альтернатив краща. З такою постановкою питання вони дійсно не можуть не зробити вибір. Однак тоді проявляється ще одна особливість правила голосування — його нетранзитивність.

Нехай, наприклад, кожне з трьох угруповань законодавців, які можуть утворити більшість лише попарно, висунули власний варіант законопроекту: a , b та c . Щоб гарантувати більшість на кожному кроці процедури, вони пред'являють альтернативи попарно. Кожна сторона керується при цьому своїм набором переваг; нехай це відповідно послідовності $a \succ b \succ c$, $b \succ c \succ a$ та $c \succ a \succ b$.

Після голосування щодо пари (a, b) в результаті одержуємо два голоси проти одного: $a \succ b$; щодо пари (b, c) маємо $b \succ c$; пари (c, a) — $c \succ a$. Голосування більшістю не дало “загальновизнаного” порядку альтернатив — $a \succ b \succ c \succ a$. У разі ж застосування процедури, згідно з якою після розгляду чергової пари відкинута альтернативу замінюють новою, остаточно прийняте рішення залежить від послідовності пред'явлення альтернатив: у разі послідовності (a, b, c) вибирають c ; у разі (b, c, a) — a ; (c, a, b) — b . Якщо таким способом прийняти законопроект, то чию думку він виражатиме — більшості чи організаторів голосування? Очевидно, що такі рішення не відповідають ідеалу погодженого групового вибору.

Причина зазначеного парадокса нетранзитивності групового вибору полягає, звичайно, у циклічності сукупності вихідних індивідуальних переваг. Однак це лише частинний приклад загальнішого **парадокса Ерроу** (або **теореми про неможливість**). Не вдаючись у подробиці та доведення, викладемо її зміст.

З усіх функцій F індивідуальних виборів R_1, \dots, R_n виділимо відповідні вимогам, що виражають наше розуміння того, який вибір можна вважати **погодженим**. Крім формальних вимог

1) $n \geq 2$, “кількість альтернатив не менша 3”, “ F визначена для будь-яких $\{R_i\}$ ”,

природно також накласти такі умови:

2) якщо в результаті групового вибору перевагу було віддано альтернативі x , то це рішення не має змінюватися, якщо хто-небудь із тих, хто раніше відкидав x , змінив свою перевагу на її користь (**умова монотонності**);

3) якщо зміни індивідуальних переваг не стосуються певних альтернатив, то в новому груповому впорядкуванні їх послідовність має бути незмінною (**умова незалежності незв'язаних альтернатив**);

4) для будь-якої пари альтернатив x та y існує такий вибір індивідуальних переваг, для якого $F(R_1, \dots, R_n) = (x \succ y)$ (**умова суверенності**); а не то можливо нав'язати альтернативу y незалежно від порядків переваг індивідуумів;

5) не має бути такого індивідуума, для якого з його переваги $x \succ y$ (для будь-яких x та y) впливає, що $F(R_1, \dots, R_n) = (x \succ y)$ незалежно від переваг інших індивідуумів (**умова того, що немає диктаторства**).

Парадокс Ерроу полягає в тому, що перші чотири умови суперечать п'ятій; не існує правила F , яке задовольняє всім п'ятьом вимогам. Аналіз причин такого несподіваного наслідку з настільки “безневинних” на вигляд припущень показує, що основну роль відіграє можливість існування циклічних множин ранжувань, що характерно для бінарних відношень, які задовольняють умову 3.

Нетранзитивність мажоритарного відношення може виявлятися в інших несподіваних формах. Розглянемо таку задачу. Нехай кож-

ний з n суб'єктів має свою частку a_i загального ресурсу $a = \sum_{i=1}^n a_i$.

Вектор $\vec{a} = (a_1, \dots, a_n)$ назвемо станом системи. Інший стан $\vec{b} = (b_1, \dots, b_n)$ з погляду i -го суб'єкта гірший, ніж \vec{a} , якщо $a_i \geq b_i$. Будемо тепер перерозподіляти ресурси на основі дуже сильної більшості: система перейде зі стану \vec{a} в стан \vec{b} , якщо стан \vec{b} не гірший, ніж \vec{a} , для всіх учасників, крім одного (за “тотально-мажоритарним правилом”). Послідовність станів $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_k$ будемо називати тотально-мажоритарним шляхом зі стану \vec{a}_1 у стан \vec{a}_k , якщо переходом у черговий стан задоволені всі учасники, крім, природно, того, чий ресурс у цей момент перерозподіляють. Нехай тепер задано два довільні стани системи: \vec{a} та \vec{b} . За яких умов існує тотально-мажоритарний шлях з \vec{a} в \vec{b} ? Виявляється, що завжди. Знову виникає парадокс: можливі будь-які перерозподіли, і всі вони виражають думку всіх суб'єктів, крім одного (правда, ці “незгодні” на різних етапах різні).

Однак часто все ж таки допустимі задачі групового вибору. По-перше, деколи може не бути циклічних ранжувань або вони не охоплюють найважливіші альтернативи чи вжито заходів для їх виявлення й усунення. По-друге, у багатьох ситуаціях “диктаторський” принцип узгодження цілком прийнятний. Це можна проілюструвати прикладом оптимізації за основним із декількох критеріїв. В інших випадках це єдино можливий принцип (наприклад, єдиноначальність в армії). По-третє, перехід (коли це можливо) до використання єдиної числової, а не порядкових індивідуальних шкал переваг може взагалі анулювати проблему нетранзитивності. По-четверте, у реальних ситуаціях мажоритарні правила застосовують у комбінації з іншими, тому, утворивши, наприклад, коаліцію, групи суб'єктів можуть блокувати голосування.

Розглянемо також проблему втручання коаліцій у механізм голосування, що фактично змінює його характер. Наприклад, у разі багатоступінчастого голосування за правилом більшості коаліція, яка перебуває в меншості, може домогтися прийняття свого рішення. Розглянемо схему голосування по три виборці більшістю в 2/3 на кожному ступені (рис. 13). Видно, що вже на другому ступені меншість може нав'язувати свою думку більшості. Якщо кількість

ступенів не обмежувати, то теоретично меншість, яка перемагає таким способом, може бути як завгодно малою.

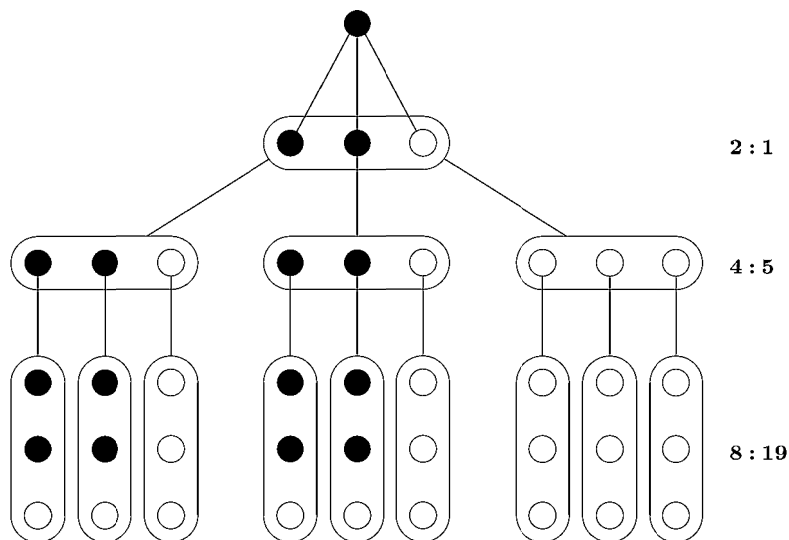


Рис. 13. Ілюстрація парадокса багатоступінчастого голосування за наявності коаліції

У дійсності також трапляється, що в разі багатоступінчастого голосування може перемогти кандидат, який не набрав дійсної більшості голосів. Наприклад, у 1876 р. президентом США було обрано Р. Хейса (185 голосів виборників), а не С. Тілдена (184 голоси), хоча за останнього віддали голоси 51 % усіх виборців. Така сама ситуація була на президентських виборах 1884, 1888 та 2000 рр.

4.5. Вибір у разі невизначеності

Дотепер ми обговорювали підходи до описання та виконання вибору тоді, коли наслідки зробленого вибору однозначні. Тоді вибір однієї з альтернатив пов'язаний з однозначним наслідком, відомим тому, хто обирає, і проблема вибору полягає в порівнянні різних наслідків.

4.5.1. Задання невизначеності за допомогою матриці

На практиці приходиться мати справу зі складнішою ситуацією, коли вибір альтернативи неоднозначно залежить від наслідку зробленого вибору: є набір можливих наслідків $y \in Y$, з яких один сполучений з обраною альтернативою, але який саме — у момент вибору невідомо, а стане зрозуміло пізніше, коли вибір уже зроблено та нічого не можна змінити. Хоча з кожною альтернативою x пов'язана та сама множина наслідків Y , для різних альтернатив однакові наслідки мають різне значення. У разі дискретного вибору альтернатив і наслідків зазначену ситуацію можна зобразити за допомогою такої матриці:

X	Y					
	y_1	y_2	\dots	y_j	\dots	y_m
x_1	q_{11}	q_{12}	\dots	q_{1j}	\dots	q_{1m}
x_2	q_{21}	q_{22}	\dots	q_{2j}	\dots	q_{2m}
\vdots	\vdots	\vdots	\dots	\vdots	\dots	\vdots
x_i	q_{i1}	q_{i2}	\dots	q_{ij}	\dots	q_{im}
\vdots	\vdots	\vdots	\dots	\vdots	\dots	\vdots
x_n	q_{n1}	q_{n2}	\dots	q_{nj}	\dots	q_{nm}

У ній усі можливі наслідки утворюють вектор $\vec{y} = (y_1, \dots, y_m)$; числа q_{ij} відповідають оцінці ситуації, коли зроблено вибір альтернативи

x_i й це дало результат y_j . У різних випадках ці числа можуть мати різний зміст: іноді це виграти, іноді втрати, платежі.

Якщо всі рядки $q_i = (q_{i1}, \dots, q_{im})$ для будь-яких i однакові, то проблеми вибору між альтернативами немає. Якщо ж рядки матриці різні, то виникає питання, яку альтернативу вибрати, не знаючи заздалегідь, який буде наслідок.

Аналогічно, у разі неперервних множин X та Y ситуацію можна описати за допомогою функції $q(x, y)$, заданої на цих множинах, $x \in X$, $y \in Y$, поставивши питання про вибір x .

Сказаного дотепер недостатньо для формальної постановки задачі вибору. За різної конкретизації цієї задачі вона набуває різного змісту, і потрібні різні методи розв'язання. Історично склалося так, що першими було формалізовано штучні, ігрові задачі, що надало всій термінології трохи легковажного звучання (сторони, що взаємодіють, називаються гравцями, обрані ними альтернативи — ходами, правила вибору — стратегіями, величини q_{ij} — виграшами, а вся теорія — теорією ігор).

Один клас задач називається іграми проти природи. У таких задачах вважають, що наслідки y_1, \dots, y_m — це всілякі “стани природи”. Бажаність кожної альтернативи x_i залежить від стану природи, але довідатися, який він, ми зможемо лише після того, як зробимо вибір.

В іншому класі задач передбачено, що наслідки Y — це множина альтернатив, з яких вибирає другий гравець. На відміну від безпристрасної Природи другий гравець дбає лише про свої інтереси, відмінні від інтересів першого гравця. При цьому матриця $Q = \|q_{ij}\|$, яка характеризує оцінки ситуацій з погляду гравця, що вибирає x , уже недостатня для опису всієї гри. Потрібно задати другу матрицю $U = \|u_{ij}\|$, що описує гру з позицій другого гравця. Задання X , Y , Q та U називається **нормальною формою гри**. Розбіжності між матрицями Q й U визначають ступінь антагонізму гравців. Якщо $q_{ij} + u_{ij} = \text{const}$ для всіх i та j , то суперництво називається **строгим**. У разі $q_{ij} + u_{ij} = 0$ маємо **гру з нульовою сумою**. Можуть бути ігри, де виграти та програші сторін не пов'язані лінійно, і це відбиває посилення чи ослаблення конфронтації сторін. Можна також розглядати зміну матриць платежів після чергового ходу. Наприклад,

дослідників зацікавили ігри з конфліктністю, що наростає. Можливі й інші узагальнення, зокрема розгляд ігор за участю більшої кількості учасників, з утворенням коаліцій між ними тощо.

4.5.2. Критерії порівняння альтернатив у разі невизначеності наслідків

Оскільки неможливо коротко розглянути всі найважливіші результати теорії ігор, подамо основні ідеї та підходи до розв'язання її задач.

Центральний момент — це введення критерію для оцінки обраного варіанта. Унаслідок невизначеності результату потрібно дати оцінку відразу цілому рядку платіжної матриці; маючи такі оцінки для всіх рядків і порівнюючи їх, ми можемо робити вибір.

Критерій вибору “найменшого з лих”, названий **максимінним**, найпоширеніший. У кожному з рядків матриці платежів найменший виграш $\min_j q_{ij}$ характеризує гарантований виграш у найгіршому випадку; його вважають оцінкою альтернативи x_i . Тепер залишається знайти альтернативу x^* , яка забезпечує найбільше значення цієї оцінки:

$$x^* = \arg \max_i \min_j q_{ij}.$$

Ця альтернатива називається оптимальною за максимінним критерієм. Оскільки часто платіжну матрицю визначають не через виграш, а через програш, той самий принцип дає **мінімаксний критерій**.

Мінімаксний критерій у край оберезний і дуже песимістичний, тому існують інші критерії. Такий, наприклад, **критерій мінімаксного жалю**, запропонований Л. Севіджем. При цьому за платіжною матрицею Q обчислюють матрицю жалів S , елементи якої визначено як

$$s_{ij} = q_{ij} - \min_i q_{ij},$$

і до неї застосовують мінімаксний критерій:

$$x^* = \arg \min_i \max_j s_{ij}.$$

Подальше послаблення песимістичності оцінки альтернатив дає **критерій песимізму-оптимізму (Гурвіца)**, який зводиться до зваженої комбінації найкращого та найгіршого наслідків. За оцінку альтернативи x_i в цьому критерії беруть величину

$$g(x_i) = \alpha \min_j q_{ij} + (1 - \alpha) \max_j q_{ij}; \quad 0 \leq \alpha \leq 1.$$

Тут α — показник песимізму-оптимізму (у разі $\alpha = 1$ маємо максимумний критерій); оптимальна альтернатива —

$$x^* = \arg \max_i g(x_i).$$

4.5.3. Загальне уявлення про теорію ігор

Деякі особливості ігрових ситуацій добре видно з найпростішого прикладу. Нехай є гра з континуальними множинами X та Y , строгим суперництвом сторін і нульовою сумою. Тому достатньо розглянути лише одну функцію платежів $q(x, y)$, яку один гравець намагається максимізувати за x , а інший — мінімізувати за y .

Якщо

$$\max_{x \in X} \min_{y \in Y} q(x, y) = \min_{y \in Y} \max_{x \in X} q(x, y),$$

точка (x^*, y^*) , у якій досягається ця рівність, водночас задовольняє амбіції обох гравців. Ця точка рівноваги інтересів сторін називається **сідловою**. Відхід від неї не вигідний обом сторонам, тому її вибір вирішує гру.

Однак існують ігри без сідлової точки. У такій ситуації вигідно приховувати від супротивника свій вибір і навіть спосіб вибору. Цього можна досягти введенням **змішаної стратегії**. На відміну від **чистої стратегії**, коли альтернативу вибирають однозначно за детермінованим правилом, змішана стратегія полягає в тому, що задають лише ймовірності вибору альтернатив, а механізм самого вибору випадковий і підкоряється заданому розподілу. У результаті одержуваний виграш стає випадковою величиною, і стратегії можна порівнювати через середні значення виграшу. Виявляється (**теорема**

фон Неймана), що *будь-які матричні ігри зі строгим суперництвом мають розв'язок у змішаних стратегіях*. Крім того, матричну гру можна звести до задачі лінійного програмування, що не тільки дає практичні методи чисельного розв'язання ігор, але й дає змогу перенести ряд теоретичних результатів з теорії програмування в теорію ігор.

4.5.4. Вибір у разі статистичної невизначеності

Існує клас задач вибору, у яких невизначеність залишається навіть після того, як проведено серію спостережень, вимірювань. Річ у тім, що дані, отримані в результаті експерименту, пов'язані з цікавим для нас аспектом явища не безпосередньо (однозначно), а в сукупності з іншими, неконтрольованими факторами.

Статистичні рішення як вибір. Нехай, наприклад, потрібно знати високоточне значення маси якогось предмета. Кількаразове його зважування на аналітичних вагах дасть хоча й близькі, але різні значення, бо на показання ваг впливають не тільки маса зважуваного предмета, але й тертя, неідеальність геометричної форми опорної призми, плин струменів повітря, тепловий режим тощо. У таких задачах виникає нетривіальна проблема вибору з урахуванням наявних даних — яке саме зі значень потрібно нам величини прийняти за істинне.

Аналогічна ситуація виникає в разі не тільки оцінки якоїсь величини, але й класифікації об'єктів (на що хворий пацієнт, якщо його стан характеризується такими-то даними аналізів; на якій глибині є нафта чи вода, якщо в результаті геофізичної розвідки отримано певну сукупність чисел), а також коли потрібно підібрати математичну модель явища (на яку криву найкраще “лягають” отримані експериментальні дані) або знайти якусь закономірність (чи впливає сонячна активність на здоров'я людей).

В усіх таких задачах є загальне — потреба у виборі на підставі непрямих або прямих, але обов'язково “зашумлених” даних. Основне, центральне, найважливіше припущення для формалізації розв'язування таких задач — про статистичність експериментальних даних. Воно полягає в тому, що зв'язок між істинною, але невідомою

шуканою альтернативою θ (будемо позначати цією буквою будь-яку закономірність, відшукувану в протоколі спостережень, вважаючи, що вона належить множині Θ можливих закономірностей, на якій треба зробити вибір) і спостереженими даними x_1, x_2, \dots, x_N можна адекватно описати розподілом імовірностей (наприклад, функцією розподілу $F(x_1, \dots, x_N \mid \theta)$ чи, якщо x_i — неперервні величини, а функція F диференційована, — щільністю розподілу ймовірностей $f(x_1, \dots, x_N \mid \theta)$). Інакше кажучи, вважають, що, по-перше, вибірка спостережень належить статистичному ансамблю всіляких вибірок, на якому задано розподіл імовірностей, і, по-друге, цей розподіл різний для різних θ , що забезпечує наявність інформації про θ у вибірці x_1, x_2, \dots, x_N . Питання полягає в тому, як отримати цю інформацію, тобто як зробити вибір на множині Θ чи прийняти статистичне рішення.

Природно “напрошується” ідея звести задачу до вже розв’язаної раніше. Таку можливість надає теорія “ігор проти природи”: вибір θ на Θ та дійсний стан θ природи можна в сукупності охарактеризувати функцією витрат $l(\hat{\theta}, \theta)$, яку розглядають як платіжну функцію гри. Такий підхід дає змогу перенести низку результатів теорії ігор у теорію статистичних рішень. Однак одні статистичні задачі не розв’язано в теорії ігор, для інших існують більш прямі й короткі способи розв’язання, треті мають настільки сильно виражену специфіку обробки експериментальних даних, що ігрова термінологія лише “затемнює” суть справи; нарешті, теорія синтезу й аналізу процедур для розв’язування статистичних задач — математична статистика — спочатку розвивалася задовго до виникнення теорії ігор, досягла значних результатів і продовжує успішно розвиватися самостійно. Із цих причин теоретико-ігровий підхід до статистики, зберігаючи своє методологічне, міждисциплінарне значення, не справив істотного впливу на прикладну статистику.

Загальна схема прийняття статистичних рішень. Повернімося до розгляду рис, загальних для задач вибору в умовах статистичної невизначеності. Обставини прийняття статистичних рішень ілюструє схема, наведена на рис. 14. На ній точкою $\theta \in \Theta$ позначено те, що нам невідоме, але його потрібно визначити; Θ — множина всіх передбачуваних можливостей відносно θ . Точкою $x \in X$ позначено

чено вибірку (протокол спостережень) $x = (x_1, \dots, x_N)$; X — множи- на всіх можливих вибірок. Те, що на значення реалізованої вибірки впливає не тільки шукана закономірність θ , але й сукупність випад- кових факторів, зображено на схемі як результат спільного відобра- ження θ та якогось випадкового впливу n в простір X за допомогою оператора $\mu: x = \mu(\theta, n)$. Знаючи x , ми маємо зробити вибір щодо θ , прийняти рішення, яку з множини альтернатив Θ взяти як істинну. Щоб не плутати прийняте рішення й “істинний” стан θ , позначимо простір, на якому роблять вибір, як Γ . Очевидно, що в Γ входять усі елементи множини Θ , але можуть увійти й додаткові рішення (ти- пу відмови від вибору, вимоги збільшити кількість спостережень або провести рандомізацію тощо). Процедuru вибору зображено як дію якогось оператора δ над вибіркою x . Кожній вибірці x цей оператор, який називається вирішувальною функцією, ставить у відповідність рішення $\gamma = \delta(x, i)$. Тут аргумент i введено, по-перше, для того, щоб підкреслити, що ту саму вибірку можна обробляти по-різному, одержуючи рішення різної якості, і, по-друге, щоб зробити акцент на тому, що якість рішення залежить не тільки від того, який про- токол оброблено, але й від того, які апріорні припущення ввійшли в структуру алгоритму.

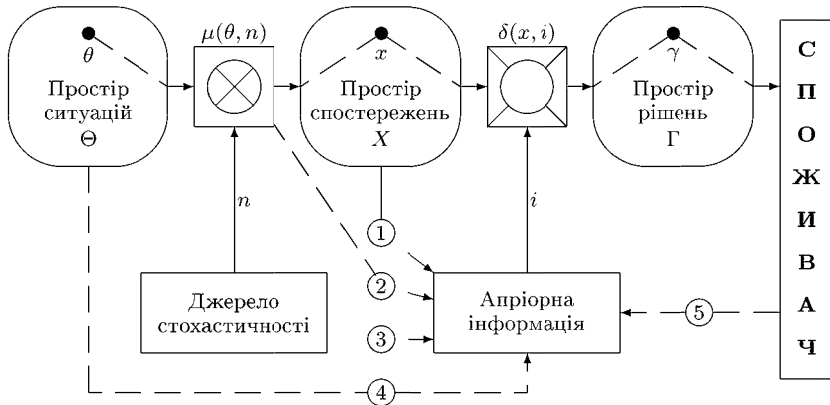


Рис. 14. Загальна схема прийняття статистичних рішень

Отже, і проблема синтезу статистичних процедур (побудови вирішувальних функцій), і проблема аналізу їх якості (оцінювання ступеня близькості між γ й θ) тісно пов'язані з роллю апіорної інформації.

Конкретизуємо, що саме в статистиці розуміють під апіорною інформацією. Це будь-які відомості, що вже були до того, як ми почали синтезувати нову процедуру δ , зокрема й будь-яка інформація про природу спостережень (але не сама вибірка x , яку вважають апостеріорною інформацією). Апіорні відомості характеризують такі аспекти:

- 1) простір ситуацій Θ ;
- 2) природу випадкових факторів n ;
- 3) оператор μ , який визначає характер взаємодії θ й n ;
- 4) простір спостережень X ;
- 5) вимоги споживача до якості рішень (нумерація та сама, що й на рис. 14).

Поняття про основні напрямки математичної статистики.

Апіорна інформація може бути більш-менш повною й точною; залежно від цього по-різному ставлять і зважають статистичні задачі вибору. Можна навіть твердити, що різним рівням апіорної інформації відповідають різні специфічні галузі математичної статистики.

Найповніший опис випадкового об'єкта полягає в заданні розподілу ймовірностей на множині можливих станів цього об'єкта, тому найбільш докладне та повне задання апіорної інформації полягає в тому, що вважають відомими такі параметри:

- розподіл $P(\theta)$, $\theta \in \Theta$;
- умовний розподіл вибірових значень $F(x | \theta)$, $x \in X$, $\theta \in \Theta$;
- функцію втрат $l(\gamma, \theta)$, яка виражає відношення споживача рішень до розбіжності між γ , тобто тим, що він має використовувати замість істинного θ , і дійсним станом θ .

Такий рівень апіорної інформації відповідає **байєсовому напрямку статистики** (Т. Байєс — відомий англійський статистик). Середнє значення втрат l , пов'язане з конкретним алгоритмом γ обробки спостережень x , яке називається **байєсовим ризиком** R , беруть як міру якості цього алгоритму. Оптимальну в цьому

розумінні процедуру γ^* (яка також називається **байєсовою**) вважають найкращим розв'язком задачі:

$$\begin{aligned}\gamma^*(x) &= \arg \min_{\gamma(x)} R(\gamma(x)) = \arg \min_{\gamma(x)} M_{X \in \Theta} l(\gamma(x), \theta) = \\ &= \arg \min_{\gamma(x)} \int \int_X \Theta l(\gamma(x), \theta) dF(x | \theta) dP(\theta).\end{aligned}$$

Найбільше суперечок виникає щодо того, чи потрібно задавати апіорний розподіл $P(\theta)$. Постулат Лапласа — Байєса, згідно з яким невідомий розподіл $P(\theta)$ вважають рівномірним у Θ , призводить до протиріч у разі деформацій простору Θ . Не допомагає й припущення про те, що невідомий розподіл $P(\theta)$ належить якомусь класу, щоб узяти в цьому класі “найгірший” розподіл і для нього знайти байєсову процедуру. Така мінімаксна процедура гарантує, що “гірше не буде”, якщо $P(\theta)$ дійсно належить заданому класу.

Суперечку між прихильниками байєсового підходу та його супротивниками можна вважати історичним непорозумінням. Зрештою було визнано, що можуть існувати й інші рівні апіорної інформації, для яких потрібно створити свої методи синтезу процедур. Наступним рівнем стала відмова від того, що потрібно знати $P(\theta)$; на цьому рівні в синтезі алгоритмів бере участь тільки інформація про сімейство функцій $F(x | \theta)$. Підставимо у функцію щільності $f(x | \theta)$ вибірккові значення x_1, \dots, x_N і розглянемо її залежність

$$L(\theta | x_1, \dots, x_N) = f(x_1, \dots, x_N | \theta)$$

від θ . Ця залежність має чудові властивості, завдяки яким її назвали **функцією правдоподібності**. Наприклад, якщо θ — невідомий числовий параметр розподілу, то

$$\hat{\theta}_{\text{м.п}} = \arg \max_{\theta} L(\theta | x_1, \dots, x_N) -$$

дуже хороша оцінка параметра (цей метод оцінювання називається **методом максимальної правдоподібності**). Коли за вибіркою x_1, \dots, x_N слід прийняти рішення на користь однієї з конкурентних

гіпотез H_0 та H_1 , тобто вирішити, це вибірка з розподілу зі щільністю $f(x | H_0)$ чи $f(x | H_1)$, то найкраща процедура — обчислення **відношення правдоподібності**

$$\frac{f(x_1, \dots, x_N | H_1)}{f(x_1, \dots, x_N | H_0)}$$

та вибір гіпотези H_1 , якщо це відношення перевищує заданий поріг, і гіпотези H_0 , якщо воно менше за нього. На цьому рівні можна приймати рішення й іншими методами; зазвичай їх застосовують завдяки простоті реалізації, але за якістю одержуваних за їх допомогою рішень вони не кращі, ніж процедури, що ґрунтуються на функції правдоподібності.

Не завжди можливо знати функцію $F(x | \theta)$ апіорі, і виникає питання, як зробити вибір, якщо ця функція невідома. Залишаючись у межах параметричних моделей, можна знову розглянути клас розподілів і скористатися мінімаксною методикою. Подібні алгоритми також застосовують у статистиці й отримують хороші результати за зроблених припущень. Як і в аналогічному розширенні класу байєсових задач, про властивості процедур мінімаксної правдоподібності можна говорити тільки тоді, коли є впевненість у тому, що реальні розподіли дійсно належать заданому класу.

Можна зовсім не знати розподілу $F(x)$, проте, звичайно, вибірка завжди підпорядкована якомусь, нехай невідомому, розподілу: припущення про статистичність спостережень чинне. Такої позиції дотримуються в статистичній теорії та практиці **непараметричної статистики**.

Незнання функціонального вигляду розподілу не означає, що взагалі нічого невідомо про нього та про властивості вибірки. Те, що ми знаємо, — це основа для побудови непараметричних процедур розв'язання задачі вибору в цих умовах. Інформація, яка не робить відомою функцію розподілу, але корисна для прийняття рішення, може бути дуже різноманітною. Наприклад, ми можемо знати, що розподіл неперервний або симетричний (зокрема, у разі вимірювання фізичних полів); із природи явища можна довідатися про деякі числові характеристики — моменти, квантилі; зазвичай відомо, чим різняться альтернативи, з яких потрібно вибирати (скажімо, якщо

новий метод діагностики ефективний, то частка правильних діагнозів має істотно перевищувати частку випадкових угадувань); іноді навіть невідомо, чим саме різняться альтернативи, просто відомо, що вони чимось відрізняються одна від одної (як у задачах перевірки правильності теоретичних моделей). Усі подібні дані можна використовувати під час синтезу вирішувальної процедури.

Є кілька підходів до синтезу непараметричних процедур. Крім евристичного, винахідницького підходу (часто досить удалого, але такого, що в ньому завжди залишається місце для сумнівів) розвиваються й теоретично обґрунтовані підходи. Наприклад, теорія інваріантності пропонує методи, де використано властивості симетрії деяких задач. Велика універсальність властива методу інтерпретації статистик як функціоналів від оцінок розподілів. Цей метод ґрунтується на двох ідеях. По-перше, усяку (чи майже всяку) статистичну задачу можна звести до вибору значення якогось функціонала $J(F)$ від невідомого розподілу $F(x)$ (основні труднощі цього методу — побудова функціонала, який містить усю апіорну інформацію, яка є в постановці задачі). По-друге, можна оцінювати цікавий для нас функціонал (тобто вибирати альтернативи), підставляючи в нього замість невідомих розподілів їх непараметричні оцінки (не знаючи їх функціонального вигляду). Хоча при цьому можна використовувати різні оцінки того самого розподілу, що дає змогу мати кілька процедур розв'язування однієї задачі, часто можна теоретично порівнювати самі процедури й вирішувати, за яких умов одна з них краща, ніж інша.

Переходячи з одного рівня апіорної інформації на інший, відмовляючись від обліку недоступної інформації, ми в результаті одержуємо, узагалі кажучи, усе гірші рішення: байєсові процедури кращі, ніж процедури правдоподібності, які, у свою чергу, кращі, ніж непараметричні. Однак, по-перше, це відношення нестрогого порядку (у деяких задачах непараметричні процедури не гірші за байєсові), а по-друге — і це головне, таке впорядкування правильне тільки для правильної апіорної інформації. У разі неправильної інформації ситуація різко змінюється: чим менше апіорної інформації закладено в процедуру, тим слабкіше її хибність погіршує рішення. Саме тому непараметричні процедури часто виявляються кращими, ніж інші.

Усе-таки повна відмова від знання розподілів — це надто сильна реакція на занадто жорсткі вимоги параметричної статистики. Існує безліч практичних ситуацій, у яких ми не знаємо розподіл точно, але знаємо його приблизно. Тоді застосування непараметричних процедур рівносильне відмові від цієї хоча й не точної, але правильної й тому корисної інформації. В останні десятиріччя розвивається нова галузь математичної статистики, яка відповідає такому рівню апріорної інформації, — **робастна статистика**. Її основна ідея полягає в тому, щоб трохи поступитися оптимальністю на точно заданому опорному розподілі, проте забезпечити певний гарантований рівень якості рішення на всіх інших розподілах, що належать околу опорного рішення. Математичний аспект цього питання пов'язаний з теорією неперервності та диференційованості функціоналів від розподілів і потребує відповідних знань, але іноді одержувані алгоритми можна легко сприйняти й на рівні здорового глузду. Наприклад, для одержання робастних оцінок середнього рекомендують обчислювати середнє арифметичне, відкинувши з вибірки найбільше та найменше значення спостережень. Саме так і роблять, визначаючи середню врожайність за кілька років; аналогічно нараховують бали у фігурному катанні. Звичайно, це найпростіший випадок, коли потрібно забезпечити стійкість до випадкового та несуттєвого відхилення, такого як суб'єктивне оцінювання чи нетипові погодні умови. Теорія робастних процедур застосовна й для складніших умов. Ще один метод, у якому розподіли з самого початку вважають заданими інтервалами, а не точними значеннями, тільки почав розвиватися.

Правила “статистичної техніки безпеки”. Невдале чи неправильне застосування статистичних методів до розв'язання реальних проблем призвело до появи досить саркастичного жарту: “Є три види неправди — просто неправда, нахабна неправда та статистика”.

Причини неправильного застосування статистичних методів нечисленні, і потрібно добре знати їх. Перелік умов, пов'язаних із негативними наслідками використання статистичних рішень, можна розглядати як своєрідну “інструкцію з техніки безпеки”.

1. *Статистичний висновок за своєю природою випадковий, він може бути надійним і точним, але майже ніколи — абсолютно достовірним.* У статистиці цього не приховують і супроводжують

кожну процедуру характеристикою її якості: оцінка параметра має фіксовану точність (яку задають, наприклад, дисперсією); прийняття однієї з гіпотез пов'язане з імовірностями помилок, про які користувача повідомляють заздалегідь. Коли потрібно посилити вимоги до якості, це зазвичай можна зробити, збільшуючи обсяг вибірки. Отже, статистичний висновок може бути помилковим, але ми можемо варіювати характеристики цих помилок (у межах наявних ресурсів).

2. *Якість рішення на виході статистичної процедури залежить від того, що подано на її вхід.* Відомі випадки, коли лаборант, який проспав, уранці сам складав “протокол” нічних спостережень і вимірювань; коли в таблиці та протоколи вносять “виправлення”, бажані особі, не зацікавленій в істині, тощо. Ясно, що статистична обробка таких “даних” дасть якийсь результат, але чи варто обвинувачувати статистику в його якості?

3. Наступний, важливіший випадок — *сумлінна омана відносно статистичності серії спостережень, коли цього насправді немає.* Можна навести багато прикладів, коли статистичній обробці було піддано інформацію, яка взагалі не має статистичної природи. Іноді це важко перевірити, особливо коли обсяги вибірки невеликі. Цьому варто приділяти спеціальну увагу в процесі організації експериментів, а в разі найменшого сумніву не покладатися на “паспортні” характеристики якості процедури, розглядати результати обробки як орієнтовні дані, матеріал для подальших досліджень.

4. Зниження очікуваної якості статистичних рішень може бути наслідком *застосування процедури, що не відповідає дійсному рівню апріорної інформації.* Якщо справжній рівень не дуже зрозумілий, то корисно обробити дані декількома способами. Розбіжність висновків має стати сигналом до пошуку її причин. Не варто приймати рішення “голосуванням процедур”, тому що небезпека нетранзитивності — властивість голосування взагалі, а не тільки голосування людей.

5. Причиною необґрунтованих претензій до статистики може бути *неправильна змістовна інтерпретація правильного статистичного висновку.* Наприклад, одне з англійських статистичних досліджень позаминого століття виявило, що здоров'я чоловіків, які носять циліндри, значно краще, ніж у тих, хто носить кепки;

виявилось також, що основний фактор, що впливає на різницю в урожайності конюшини в сусідніх селах, була... кількість старих дів. Таким (і подібним) правильним висновкам можна надати зовсім різного змісту. (До речі, виявилось, що англійські старі діві тримають по декілька кішок, а миші люблять розоряти гнізда джмелів — основних запильників конюшини.) Дійсні причини виявленого статистичного зв'язку можуть залишатися незрозумілими. Інтерпретація залежностей — це не завдання статистики, і не можна засуджувати її за неправильну інтерпретацію.

4.5.5. Вибір у разі розпливчастої невизначеності

Будь-яка задача вибору зводиться до цільового звуження множини альтернатив. Як альтернативи (їх ознаки, параметри тощо), так і правила їх порівняння (критерії, відношення) описують у термінах якоїсь вимірювальної шкали. Відомо, що будь-яка шкала може бути розмитою. Точніше кажучи, у житті ми часто стикаємося з ситуаціями, описати які можна лише в розмитих шкалах. Це, зрозуміло, стосується й ситуацій, у яких потрібно робити вибір. У результаті ми отримуємо задачі вибору в разі розпливчастої невизначеності. Кожній із розглянутих раніше задач можна поставити у відповідність кілька розпливчастих задач, оскільки розмитими можуть виявитися всі чи тільки деякі компоненти задач. Дотепер розглянуто лише незначну кількість таких задач, однак ведеться робота в цьому напрямку.

Багатокритеріальний вибір у розпливчастій ситуації. Уже в першій роботі з прийняття рішень у розпливчастій ситуації Р. Беллман і Л. Заде запропонували подавати й цілі, й обмеження як розмиті множини на множині альтернатив (у разі однієї мети й одного обмеження це відповідає заданню множин $G = \{x, \mu_G(x)\}$ і $C = \{x, \mu_C(x)\}$). Наступний важливий крок полягав у визначенні розмитого рішення D як перетину розмитої мети G та розмитого обмеження C , тобто

$$\mu_D(x) = \min[\mu_G(x), \mu_C(x)].$$

Узагальнення для більшої кількості умов очевидне. Якщо з роз-

мітої множини D потрібно виокремити якусь альтернативу, то можна діяти по-різному (аж до рандомізації вибору), наприклад максимізувавши $\mu_D(x)$:

$$x^* = \arg \max_{x \in X} \mu_D(x).$$

За такої постановки задачі вибору напрошується ідея про те, щоб узагалі інтерпретувати функцію належності i -ї умові як i -й критерій якості й повернутися до багатокритеріальних задач.

Цікаві дослідження в цьому напрямку зроблено Дж. Естером. Він розглянув суперкритерій вигляду

$$Z_p(x) = \left\{ \sum_{i=1}^m g_i [\mu_i(x)]^p \right\}^{1/p},$$

де m — кількість розмитих умов; $0 \leq g_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^m g_i = 1$; $\mu_i(x)$ — функція належності i -ї умові; p — параметр суперкритерію. Це подання цікаве не тільки властивостями, що полегшують математичний розгляд задачі (наприклад, монотонністю та неперервністю за всіма компонентами), але й тим, що воно охоплює широкий клас частинних суперкритеріїв. Так, у разі $p \rightarrow -\infty$ отримуємо оператор визначення мінімального елемента із заданої сукупності, у разі $p = 0$ — оператор множення, $p = 1$ — оператор додавання, $p \rightarrow +\infty$ — оператор визначення максимального елемента. Отже, задача відшукування найкращої альтернативи x^* зводиться до максимізації критерію $Z_p(x)$:

$$x_g^* = \arg \max_{x \in X} Z_p(x).$$

Очевидно, що при цьому розв'язок залежить від конкретного набору коефіцієнтів $g = \{g_i\}$. Позначимо як $E(p)$ множину $\{x_g^*\}$, яка відповідає різним g в разі фіксованого p . Дж. Естер знайшов цікаві властивості множин $E(p)$: для всіх $-\infty < p_1 \leq p_2 < +\infty$ правдиве включення $E(p_2) \subseteq E(p_1) \subseteq \text{ПМ}$, де ПМ — паретівська множина.

Функції належності взагалі знаходити непросто, а в разі застосування викладеного підходу, крім того, потрібно, щоб вони мали також зміст критеріальних функцій у задачі вибору. Це може бути й незручно, і безглуздо. С. Орловський запропонував не змінювати змісту критеріїв якості альтернатив і не ототожнювати критеріальні функції з функціями належності, а відображати в моделі розпливчастість шкал, у яких ці критерії зафіксовано (якщо така розпливчастість ϵ). Передбачено, що критеріальні функції $q_i(x)$ належать до параметричних сімейств, тобто $q_i(x) = J_i(x, \bar{q})$, і вважають, що розпливчастість критеріальних функцій зводиться до розпливчастості в описі параметрів \bar{q} : $Q = \{\bar{q}, \mu_Q(q)\}$. Тепер для кожної альтернативи x значення критерію $J_i(x, \bar{q})$ належить розмитій множині, функція $\mu_i(J_i(x))$ належності до якої залежить від x і від конкретного вигляду функцій $J_i(x, \bar{q})$ та $\mu_Q(\bar{q})$. Носій цієї множини може бути як обмежений зверху величиною $J_i^0(x)$, так і не обмежений. Якщо природного обмеження знизу немає, то його можна ввести штучно, задавши якийсь рівень α ($0 < \alpha < 1$) для функції належності та взявши як $J_i^0(x)$ найменший корінь рівняння $\mu_i(J_i(x)) = \alpha$. У результаті величини $J_1^0(x), \dots, J_m^0(x)$ можна розглядати як нові (і вже нерозмиті!) критеріальні функції, і ми повертаємося до стандартної багатокритеріальної задачі, яку можна розв'язувати будь-яким зі стандартних методів.

Закінчуючи огляд розпливчастих варіантів критеріальних задач вибору, розглянемо ще задачі, пов'язані з використанням відстаней між точками в просторі альтернатив. У разі розпливчастого опису альтернатив відстань визначають через модулі різниць функцій належності, наприклад

$$d(x_i, x_j) = \left(\frac{1}{m} \sum_{r=1}^m |\mu_r(x_i) - \mu_r(x_j)|^p \right)^{1/p},$$

де $\mu_r(x)$ — функція належності за r -ю ознакою розглядуваної множини. Такі відстані використовують у задачах класифікації.

Некритеріальні задачі розпливчастого вибору. Певні успіхи досягнуто й у розгляді розпливчастих варіантів вибору, описуваного мовою бінарних відношень. По-перше, зроблено розпливчасте

узагальнення відношення переваги. Розміте **відношення R слабого порядку** означають як відношення, що задовольняє розмитим умовам зв'язності та транзитивності:

$$x_i \neq x_j \Rightarrow \mu_R(x_i, x_j) > 0 \text{ чи } \mu_R(x_j, x_i) > 0 \quad (\text{зв'язність});$$
$$\mu_R(x_i, x_k) = \max_{x_j} \left\{ \min [\mu_R(x_i, x_j), \mu_R(x_j, x_k)] \right\} \quad (\text{транзитивність}).$$

Якщо умову зв'язності замінити умовою

$$\mu_R(x_i, x_j) > 0 \Rightarrow \mu_R(x_j, x_i) = 0 \quad (\text{асиметрія}),$$

то таке впорядкування називається **сильним**.

По-друге, Л. Заде показав, що будь-яке розпливчате відношення R можна розкласти за α у вигляді об'єднання нерозмитих множин R_α з функціями належності

$$\mu_{R_\alpha}(x_i, x_j) = \begin{cases} \alpha, & \text{якщо } (x_i, x_j) \in R_\alpha, \\ 0, & \text{якщо } (x_i, x_j) \notin R_\alpha, \end{cases}$$

де $0 < \alpha < 1$.

4.6. Переваги та недоліки ідеї оптимальності

В усіх розглянутих вище варіантах задач вибору проблема полягала в тому, щоб у вихідній множині знайти найкращі в заданих умовах, тобто оптимальні, альтернативи. Тут велике значення має кожне слово. Говорячи “найкращі”, ми припускаємо, що нам відомий критерій, спосіб порівняння варіантів і відшукування найкращого з них. Однак цього мало: важливо врахувати умови, обмеження, тому що їх зміна може зумовити те, що за того самого критерію найкращим виявиться інший варіант.

4.6.1. Переваги оптимізаційного підходу

Ідея оптимальності — центральна в кібернетиці. Поняття оптимальності строго й точно формалізоване в математичних теоріях; воно міцно ввійшло в практику проектування й експлуатації технічних систем, зіграло важливу роль у формуванні сучасних системних ідей; його широко використовують в адміністративній і навіть суспільній практиці; воно відоме майже кожній людині. І це не дивно: в ідеї оптимальності ніби знайшло своє відбиття, чітку та зрозумілу форму прагнення до підвищення ефективності праці, творчості, будь-якої спрямованої діяльності, природне для людини. Розбіжність між строго науковим і “загальноприйнятим”, життєвим розумінням оптимальності зовсім невелика. Правда, вирази типу “найоптимальніший” чи “домагтися максимального ефекту з мінімальними витратами” математично некоректні, але особи, які використовують їх, насправді просто нестрого й невдало передають правильну думку: тільки-но справа стосується конкретної оптимізації, вони швидко та легко виправляють формулювання.

Особливо важливо знаходити оптимальні варіанти для оцінки стану сучасної техніки та визначення перспектив її подальшого розвитку. Знання параметрів оптимальної альтернативи дає змогу скласти уявлення про принципово неперевершувані межі можливостей техніки; порівняння з цими параметрами часто допомагає вирішити питання про доцільність подальших зусиль щодо поліпшення того чи іншого показника якості виробу. Часто виявляється, що за допомогою наявної апаратури значення критерію якості можна збільшити лише на кілька відсотків; це означає, що й без оптимізації досягнуте значення вже належить околу оптимуму. Однак нерідко оптимізація розкриває значні резерви поліпшення: якщо зміну критерію якості на кілька відсотків на практиці важко помітити й реалізувати, то розрив у десятки відсотків уже “обіцяє” істотне поліпшення, яке відповідає затрачуванім зусиллям. Іноді ж цей розрив настільки великий, що виникає питання про те, чи немає принципово нових перспектив розвитку якоїсь галузі техніки.

4.6.2. Обмеженість оптимізаційного підходу

Попри очевидну корисність ідеї оптимізації на практиці потрібно застосовувати її обережно. Для такого висновку є досить вагомі підстави.

1. Оптимальне рішення часто виявляється дуже “тендітним”: *незначні на перший погляд зміни в умовах задачі можуть зумовити вибір істотно відмінних альтернатив. У зв'язку з цим у теорії останнім часом приділяють усе більше уваги таким модифікаціям поняття оптимальності, які додають рішенням певної стійкості.*

2. Оптимізація завжди спирається на припущення, що використувані в задачі критерії досить добре відображають поставлену мету. Навіть якщо це й так, то зазвичай розглянута система являє собою частину якоїсь більшої системи, і тоді локальна оптимізація зовсім не обов'язково дасть результат, очікуваний від підсистеми в разі оптимізації системи в цілому. *Це зумовлює потребу погоджувати критерії підсистем із критеріями системи, часто роблячи непотрібною локальну оптимізацію.*

3. Максимізацію критерію оптимальності часто ототожнюють із метою, хоча це різні речі. Фактично критерій і мета пов'язані один з одним, як модель і оригінал, зі всіма особливостями, що звідси випливають. Багато цілей важко чи навіть неможливо кількісно описати. Однак, якщо потрібно, це можна зробити більш-менш удаю. Звичайно, кількісний критерій — це лише сурогат мети. *У цьому разі критерій характеризує мету лише побічно — іноді краще, іноді гірше, але завжди приблизно.*

4. У понятті оптимальності крім критеріїв не менш важливу роль відіграють обмеження. Навіть невеликі їх зміни істотно позначаються на рішенні. Ще більш разючий ефект можна одержати, знімаючи одні обмеження та додаючи інші. У цьому моменті міститься серйозна “пастка”, якщо застосовувати оптимізаційний підхід до складних систем, на що звернув увагу Н. Вінер уже в перших публікаціях із кібернетики. *Небезпека полягає в тому, що, не задавши всіх потрібних обмежень, ми можемо водночас з оптимізацією основного критерію одержати непередбачені й небажані супутні ефекти.* Думка Н. Вінера про те, що стосовно складних систем ми принципово не

в змозі заздалегідь визначити всі умови й обмеження, які внеможливають небажані наслідки оптимізації, дала йому змогу зробити похмуре припущення про катастрофічні наслідки кібернетизації суспільства.

Отже, з позицій системного аналізу можна охарактеризувати оптимізацію так: це могутній засіб підвищення ефективності, але використовувати його слід усе обережніше в міру збільшення складності проблеми.

Багато задач проектування технічних систем можна досить добре формалізувати, звести до математичних моделей, які дають змогу ставити й розв'язувати оптимізаційні задачі. Однак навіть після успішного подолання складностей формалізації системотехнічних проблем залишаються дві "настки": нестійкість оптимальних рішень, тобто їх сильна чутливість до змін умов, і неоднозначність постановки багатокритеріальних задач. Можна вживати таких запобіжних заходів: досліджувати чутливість, користуватися стійкими (робастифікованими) процедурами; виділяти паретівські множини альтернатив із подальшим їх звуженням за допомогою додаткової інформації чи розглядати оптимальні за декількома різними згортками критерії тощо.

Ситуація істотно ускладнюється в разі переходу від чисто технічних або технологічних проблем до пов'язаних з організаційними та соціальними питаннями. Саме на розробку методів розгляду таких проблем спрямовано тепер основні зусилля в системному аналізі. Ми докладніше розглянемо їх далі. Складні системи тому так називаються, що вони не піддаються повній формалізації. Отже, оптимізаційні задачі, які вдається поставити під час дослідження складних систем, неминуче частинні, допоміжні, якщо описують добре структуровані підсистеми, або наближені, якщо стосуються системи в цілому. Тому оптимізація в таких дослідженнях — не кінцева мета, а засіб, проміжний, а іноді й початковий етап роботи. Загострюючи цей момент, деякі автори пишуть, що питання не в тім, чи можуть люди максимізувати якісь параметри, а в тім, чи потрібно це робити. Запобіжний захід у подібних ситуаціях — розглянути дані для подальшого аналізу, щоб змінити самі задачі оптимізації.

4.6.3. Оптимізація та субоптимізація

Проблема вибору між оптимізацією та субоптимізацією виникає лише тоді, коли немає чіткого розмежування між моделями та реальністю.

1. Оптимум і оптимізацію використовують для вираження “імперативу науки”, тобто пізнавального імперативу.

2. Оптимум можна визначити лише тоді, коли задача має форму оптимізаційної моделі.

3. Оптимізацію можна означити як максимізацію функції корисності в межах моделей, а субоптимізацію — як максимізацію функції корисності в умовах реального світу. Тоді корисність являє собою поєднання кінцевих і проміжних цілей.

4. Субоптимум — це все, що має менше значення, ніж оптимум.

5. У реальних умовах часто неможливо знайти оптимум, тому ми працюємо з субоптимізацією та субоптимумами.

6. Щоб можна було поставити мету, приймаючи рішення в реальних умовах, ми маємо постулювати існування якогось оптимуму — “найкращого рішення”. У такому разі оптимізувати — це працювати в напрямку досягнення найкращого рішення.

7. Існують хороші та погані субоптимізації. Перші сприяють розробці й застосуванню того, що нині вважається найкращим рішенням, другі ж заважають реалізувати найкраще рішення.

Як досягти субоптимізації? Зрозумівши потребу в ній, слід сформулювати певні правила, що вказують напрям досягнення кращих субоптимізацій.

Правило 1. Маючи справу з ієрархічною системою, потрібно слідкувати за тим, щоб цілі систем нижчого рівня відповідали цілям систем вищого рівня.

Правило 2. Оптимальність за Парето. Субоптимізацію потрібно ранжувати відповідно до того, наскільки вона збільшує прибуток кожної підсистеми без зменшення корисності якої-небудь підсистеми чи системи в цілому.

Правило 3. Небезпека розплати за невдалі субоптимізації зменшується зі збільшенням розглядуваних систем. Вплив побічних ефектів зменшується, коли системи інтегровані в крупніші.

Правило 4. Розміри системи мають зростати до такої точки, де переваги, що виникають унаслідок впливу побічних ефектів, продовжують переважувати негативні моменти роботи з системою, складність якої може перевершити можливості системного аналізу.

Правило 5. Унаслідок великих масштабів і розгалуженості деяких задач їх можна розв'язати лише на найвищому організаційному рівні системи. Чим нижчий рівень, на якому розглядають таку систему, тим більша небезпека, що буде втрачено чи не помічено її важливі зв'язки з іншими системами.

Правило 6. Оцінюючи та вибираючи субоптимізації, слід віддавати перевагу тим із них, які задовольняють вимогам системного підходу, а не тим, що являють собою “частинні поправки”.

Правило 7. Принцип обмеженої раціональності — не слідувати нерозумним крайностям раціональності. Інакше кажучи, може бути вигідніше розглянути проміжні оптимуми в пошуках кінцевого й багато разів переглядати цілі та дані на шляху до прийняття рішення.

Правило 8. Міру субоптимізації можна змінювати з плином часу, якщо приймати такі рішення, які допускають широке коло випадковостей і можливостей.

Правило 9. Пошук глобального оптимуму можна порівняти з моделлю “засоби — цілі”. Ми не знаємо, слід нам рухатися вперед чи назад ланцюжком засобів і цілей; однак ми весь час маємо прагнути визначити проміжні цілі, які б відповідали кінцевим.

4.7. Експертні методи вибору

У процесі дослідження складних систем виникають проблеми, що виходять за межі формальних математичних постановок задач. Тоді звертаються до послуг експертів — осіб, чий судження й інтуїція можуть зменшити складність проблеми. У подальшому ми докладніше розглянемо роботу експертів — системних аналітиків; зараз обговоримо питання залучення експертів до розв'язання конкретної й частинної задачі системного аналізу — задачі вибору. Правда, у ній є й деякі загальні риси експертних методів (наприклад, підходи до оцінки компетентності експертів, до інтерпретації результатів тощо).

Основна ідея експертних методів полягає в тому, щоб використувати інтелект людей, їхню здатність шукати та знаходити розв'язок слабко формалізованих задач. Однак інтелектуальна діяльність багато в чому залежить від зовнішніх і внутрішніх умов. Тому в методиках організації експертних оцінок спеціальну увагу приділяють створенню сприятливих умов і нейтралізації факторів, які негативно впливають на роботу експертів.

4.7.1. Фактори, що впливають на роботу експерта

Дуже важливу роль відіграють фактори психологічного характеру. Насамперед, експерти мають бути звільнені від відповідальності за використання результату експертизи. Річ не тільки в тім, що особа, яка приймає рішення, не хоче чи не має покладати відповідальність на інших, але й у тім, що сама відповідальність накладає психологічні обмеження на характер вибору, а цього на стадії оцінки альтернатив бажано уникати. Однак це ще не все. Доводиться також ураховувати, що оцінка, яку дає експерт, може залежати від міжособистісних відносин з іншими експертами й іноді навіть від того, чи відома вона іншим особам. На хід експертизи можуть вплинути й особиста зацікавленість експерта, тобто його необ'єктивність, і його особистісні якості (самолюбність, конформізм, сила характеру та ін.). З іншого боку, зазвичай складність проблеми виходить за межі можливостей однієї людини. Було б нерозумно не використовувати те, що колективна діяльність відкриває додаткові можливості для взаємного стимулювання експертів.

Оскільки взаємодія між експертами може як стимулювати, так і гальмувати їхню діяльність, у різних випадках використовують методики експертиз, що мають різні ступінь і характер взаємного впливу експертів один на одного: анонімні та відкриті опитування й анкетування, наради (комітети, колегії, комісії, штаби), дискусії (консиліуми, суди, учені ради), ділові ігри, мозковий штурм тощо. Розглянемо найтипівші процедури експертного вибору.

4.7.2. Методи обробки думок експертів

Найпростіший варіант такий. Експертам роздають анкети з проханням оцінити запропоновані альтернативи. Заповнені анкети збирають, обробляють; отриману інформацію в узагальненому вигляді передають особі, яка приймає рішення. На практиці виникає низка питань, відповіді на які зумовлюють вибір способу обробки експертних думок у кожному конкретному випадку.

Припустімо, наприклад, що експерти оцінюють альтернативи в числових шкалах. Нехай $q_j(x_i)$ — оцінка i -ї альтернативи j -м експертом ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$). Оцінки $q_1(x_i), \dots, q_n(x_i)$ можна розглядати як результат вимірювання шуканої істинної характеристики $q(x_i)$, уважаючи відхилення $q_j(x_i) - q(x_i)$ випадковими величинами. Як наближення можна використовувати якийсь статистичний показник $\hat{q}(x_i) = \hat{q}(q_1(x_i), \dots, q_n(x_i))$; зазвичай це вибіркове середнє

$$\hat{q}(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j(x_i).$$

При цьому як **ступінь узгодженості думок експертів** розглядають величину

$$s_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [q_j(x_i) - \hat{q}(x_i)]^2,$$

але можна використовувати й інші показники.

Справа виявляється складнішою, коли альтернативи не можна оцінити відразу одним числом, й експертам пропонують дати оцінки окремо за кожним показником. Наприклад, оцінка якості промислового виробу складається з оцінок соціальних ознак (рівень потреб), функціональних (ступінь відповідності призначенню), економічних, естетичних, ергономічних тощо. У цьому разі маємо набір чисел $q_{jk}(x_i)$, де k — номер ознаки. Крім цих чисел експертів просять оцінити ступінь важливості λ_{jk} кожного показника (якщо це не зроблено іншим способом). Тоді

$$\hat{q}(x_i) = \frac{1}{n} \sum_j \sum_k \lambda_{jk} q_{jk}(x_i).$$

Наступне уточнення вводять у разі неоднорідності групи експертів. Природно надати різні (а не однакові, що дорівнюють $1/n$) ваги думкам експертів, які мають різну кваліфікацію. Визначення коефіцієнта α_j компетентності j -го експерта можна доручити самим експертам¹. Нехай кожен із них (l -й) оцінює компетентність інших числами $0 \leq \alpha_{lj} \leq 1$ (свою — числом α_{ll}). Усереднення дає $\alpha_j = \sum_l \frac{\alpha_{lj}}{\sum_s \alpha_{ls}}$ (при цьому, мабуть, передбачено, що компетентність в оцінці компетентності в експертів однакова; очевидно, тут доцільніше використовувати робастний варіант із відкиданням найвищої та найнижчої оцінок). У результаті одержують підсумкову оцінку

$$\hat{q}(x_i) = \sum_j \sum_k \alpha_j \lambda_{jk} q_{jk}(x_i).$$

Якщо експерти лише впорядковують альтернативи, тобто використовують тільки порядкову шкалу, арифметичні операції неможливі. Тоді переходять до обробки відносних частот переваг даної альтернативи чи рангів; іноді використовують “медіанну” альтернативу чи відстані між ранжуваннями.

Наведемо найрозповсюдженіші методи обробки експертної інформації в разі використання порядкових шкал.

¹Ваги експертів можна отримати й так. Нехай одних і тих самих експертів багато разів залучали для оцінювання відомих числових величин Θ_i^* , $i = \overline{1, k}$. Позначимо як Θ_{ji} оцінку j -го експерта, $j = \overline{1, n}$, в i -й експертизі. Тоді відносна похибка j -го експерта в i -й експертизі

$$\varepsilon_{ji} = \frac{|\Theta_i^* - \Theta_{ji}|}{\Theta_i^*}, \quad \Theta_i^* \neq 0,$$

а вагу j -го експерта обчислюють за формулою

$$\alpha_j = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\sum_{s=1}^{k_i} \varepsilon_{is} / k_i \right]}{\sum_{s=1}^{k_j} \varepsilon_{js} / k_j},$$

де k_j — кількість оцінок, даних j -м експертом.

1. Результати опитування експертів зводять у таблицю, i -й рядок якої складають місця (ранги), дані i -м експертом об'єктам (альтернативам). Різним об'єктам приписують різні місця (строге ранжування). В останній рядок записують суми рангів, отриманих об'єктами від експертів. Об'єкти впорядковують відповідно до сум рангів. На перше місце ставлять об'єкт, у якого вона найменша, і т. д. Ступінь узгодженості думок експертів визначають за допомогою **коефіцієнта конкордації**

$$w = \frac{12 \sum_{i=1}^k [r_i - 0,5n(k+1)]^2}{n^2(k^3 - k)},$$

де k — кількість об'єктів; r_i — сума рангів i -го об'єкта; n — кількість експертів.

2. На відміну від попереднього методу, деяким об'єктам приписують однакові ранги, тобто вони “ділять між собою місця” (нестроге ранжування). Так, якщо два об'єкти, на думку i -го експерта, ділять між собою 3-є–4-е місця, а три об'єкти — 7–9-е, то перші два об'єкти отримують ранг 3,5, інші — 8. **Коефіцієнт конкордації для нестрогого ранжування** визначають за формулою

$$w = \frac{12 \sum_{i=1}^k [r_i - 0,5n(k+1)]^2}{n^2(k^3 - k) - n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} (t_{ij}^3 - t_{ij})},$$

де k_i — кількість груп однакових рангів за оцінкою i -го експерта; t_{ij} — кількість однакових рангів у j -й групі за оцінкою i -го експерта (у наведеному вище прикладі $k_i = 2$, $t_{i1} = 2$, $t_{i2} = 3$).

3. **Метод Кондорсе**. Кожен експерт задає строге ранжування об'єктів r_j , $j = \overline{1, m}$. Нехай n_1^{ij} — кількість експертів, у ранжуваннях яких $r_i \succ r_j$; n_2^{ij} — кількість експертів, для яких $r_i \prec r_j$. Оскільки ранжування строгі, то $n_1^{ij} + n_2^{ij} = n$ для будь-яких i та j . Якщо для об'єкта r_j $n_1^{i_1j} \geq n_2^{i_1j}$ для всіх $j \neq i_1$, то його в колективному ранжуванні ставлять на перше місце. До об'єктів, що залишилися, застосовують аналогічну процедуру.

Для нестрогих ранжувань процедура побудови колективного ранжування може бути такою:

а) у колективному ранжуванні $r_i \succ r_j$, якщо $n_1^{ij} > n_2^{ij}$ і $n_1^{ij} + n_2^{ij} > n - n_1^{ij} - n^{ij}$ ($n - n_1^{ij} - n^{ij}$, очевидно, дорівнює кількості експертів, для яких $r_i \sim r_j$);

б) у колективному ранжуванні $r_i \sim r_j$, якщо $n_1^{ij} + n_2^{ij} \leq n - n_1^{ij} - n^{ij}$ або $n_1^{ij} = n_2^{ij}$.

4. Метод парних порівнянь для нестрогого ранжування полягає в тому, що на підставі зазначених експертом переваг будують матриці

$$A^l = (a_{ij}^l)_{i,j=\overline{1,n}}, \quad a_{ij}^l = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i \succ j \text{ для } l\text{-го експерта,} \\ 0 & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Очевидно, що $a_{ij}^l + a_{ji}^l = 1$, $i \neq j$. Далі обчислюють матрицю $A = \sum_{l=1}^n A^l = (a_{is})_{i,s=\overline{1,n}}$ і величини $a_s = \sum_{i=1}^n a_{is}$, $s = \overline{1,n}$. Альтернативи впорядковують відповідно до значень a_s . Альтернатива з найменшим a_s отримує ранг 1 і т. д.

Коефіцієнтом узгодженості думок експертів називається величина

$$v = \begin{cases} 1 - \frac{24d}{k^3 - k} & \text{для } k = 2m - 1, \\ 1 - \frac{24d}{k^3 - 4k} & \text{для } k = 2m, \end{cases}$$

де d — кількість циклів довжиною 3 в матриці A (оскільки максимальна кількість циклів довжиною 3 в матриці A дорівнює $(k^3 - k)/24$ для непарного k та $(k^3 - 4k)/24$ для парного k , маємо $0 \leq v \leq 1$); m — натуральне число. Якщо величину v визначено для матриці переваг l -го експерта A^l , то її можна вважати оцінкою його компетентності.

5. Алгебричні методи полягають у введенні якоїсь відстані між ранжуваннями та визначенні як вислідного такого з них, для якого певний додатковий критерій набуває найменшого значення.

На підставі ранжування, зробленого l -м експертом, будують матрицю

$$A^l = (a_{ij}^l)_{i,j=\overline{1,n}}, \quad a_{ij}^l = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i \succ j \text{ для } l\text{-го експерта,} \\ 0, & \text{якщо } i \sim j \text{ для } l\text{-го експерта,} \\ -1, & \text{якщо } i \prec j \text{ для } l\text{-го експерта.} \end{cases}$$

Відстань d між ранжуваннями A та B (між матрицями, які їм відповідають) вводять за допомогою формули

$$d(A, B) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} - b_{ij}|,$$

де a_{ij} і b_{ij} — відповідно елементи матриць A та B .

Вислідні (колективні, групові) ранжування задають виразами

$$A_0 \in \operatorname{Arg} \min_{A \in \Omega} \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i d(A, A^i)}{\sum_{i=1}^n \alpha_i};$$

$$A'_0 \in \operatorname{Arg} \min_{A \in \Omega} \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i d^2(A, A^i)}{\sum_{i=1}^n \alpha_i};$$

$$A''_0 \in \operatorname{Arg} \min_{A \in \Omega} \max_{i=\overline{1,n}} \frac{\alpha_i d(A, A^i)}{\sum_{i=1}^n \alpha_i},$$

де Ω — множина матриць, які відповідають усім можливим ранжуванням, α_i — вага i -го експерта.

Ранжування A_0 називається **медіаною Кемені — Снелла**, A'_0 — **середнім значенням**, A''_0 — **компромісом**¹.

¹Міру близькості між ранжуваннями R^l і R^s можна ввести й так:

$$d(R^l, R^s) = \sum_{j=1}^n |\rho_j^l - \rho_j^s|,$$

У практичних задачах дуже часто важливо не лише зазначити перевагу однієї альтернативи над іншою (або побудувати ранжування), а й оцінити степінь цієї переваги.

Нехай ранжуванню альтернатив $x_1 \succ x_2 \succ \dots \succ x_m$ відповідає вектор числових оцінок $\vec{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$.

Розглянемо один із методів визначення оцінок.

Метод фон Неймана — Моргенштерна. Нехай $m = 2$. Маємо ранжування $x_1 \succ x_2$, й альтернативі x_2 приписують оцінку $\beta_2 = 1$. Експерт вибирає таке значення величини γ , $0 < \gamma \leq 1$, для якого, на його думку, $\gamma\beta_1 = \beta_2$. З останнього співвідношення випливає $\beta_1 = 1/\gamma$.

Якщо $m = 3$, то $\beta_3 = 1$, й експерт шукає значення γ_1, γ_2 з умов $\gamma_1\beta_1 = \beta_3, \gamma_2\beta_2 = \beta_3$, звідки $\beta_1 = 1/\gamma_1, \beta_2 = 1/\gamma_2$. Після цього експерт має визначити γ_3 з умови $\gamma_3\beta_1 = \beta_2$. Оцінки альтернатив вважають узгодженими, якщо $\gamma_3 = \gamma_1/\gamma_2$, а не то експерт переглядає початкові значення γ_1, γ_2 .

У загальному випадку в разі m альтернатив кількість перевірок дорівнює

$$1 + 2 + \dots + m - 2 = \frac{(m-1)(m-2)}{2}.$$

Загальна кількість оцінок, які повинен дати експерт, складається з $m - 1$ початкових оцінок і $(m - 1)(m - 2)/2$ вторинних — усього $m(m - 1)/2 = C_m^2$.

Отримані в результаті оцінки $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ абсолютні. Для отримання відносних оцінок потрібно обчислити значення

$$g_i = \beta_i / \sum_{j=1}^m \beta_j, \quad i = \overline{1, m}.$$

де ρ_j^l — ранг (місце) j -го об'єкта в ранжуванні R^l . Тоді вислідне ранжування R^* (медіану Кука — Сейфорда) визначають так:

$$R^* \in \text{Arg min}_R \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i d(R, R^i)}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}.$$

Для підвищення об'єктивності процедури її можна легко узагальнити на випадок n експертів (використавши, наприклад, алгоритм надання думкам експертів ваг).

Більше інформації про порівнювані альтернативи можна одержати, вивчаючи “тонку структуру” суджень експертів. Річ у тім, що оцінки експертів “розкидані” в просторі критеріїв або впорядкувань нерівномірно, і найчастіше можна виділити кілька кластерів, тобто купчасто розміщених оцінок; можна знайти й “викиди”, тобто оцінки, віддалені від кластерів. Цікаво з'ясувати, що спільне між близькими оцінками та які розбіжності між віддаленими. Це роблять уже в ході уточнювальних опитувань, в інших термінах.

4.7.3. Метод “Дельфі”

Наступний крок у розвитку експертних оцінок — метод “Дельфі”. Основна його ідея полягає в тому, що критика благойдно впливає на експерта, якщо вона психологічно не пов'язана з персональною конфронтацією. Тому якщо оцінювати альтернативи в кількаторів, повідомляючи після кожного повні підсумки та зберігаючи анонімність учасників, то експерти схильні не тільки критикувати, але й прислухатися до критики, яка стосується їх особисто. Усунення психологічних труднощів, пов'язаних із персональною критикою, додає їй дієвості й об'єктивності, вона легше сприймається. Усе це зумовлює те, що зазвичай виявляється достатньо таких чотирьох етапів:

- 1) роздача анкет, збір оцінок, їх узагальнення із зазначенням розкиду думок;
- 2) оголошення підсумків і запит пояснень причин індивідуального відхилення від середньої чи медіанної оцінки першої ітерації;
- 3) оголошення всіх пояснень і запит контраргументів на них;
- 4) оголошення заперечень і запит нових оцінок альтернатив, якщо експерт побажає змінити їх; підбиття остаточного підсумку.

Усю роботу проводять під керівництвом окремої керівної групи, до якої входять системний аналітик і особа, яка приймає рішення; анонімність експертів зберігають до кінця роботи (а за бажанням

експертів — і після її закінчення). Методика “Дельфі” показала на практиці високу ефективність.

4.8. Людино-машинні системи та вибір

Основна причина виникнення системного аналізу — потреба в розв’язанні складних проблем, керуванні складними системами. Багато істотних особливостей подолання складності можна простежити на прикладі конкретного етапу, який являє собою хоча й важливу, але лише складову частину керування, — етапу вибору (ухвалення рішення).

За будь-якого трактування складності простоту розуміють однаково: простий той випадок, коли стороння допомога не потрібна. У складних випадках, особливо якщо той, хто приймає рішення, стикається зі складністю в тяжких умовах дефіциту часу чи інших екстремальних обставинах, йому потрібна кваліфікована допомога в оцінці можливих альтернатив.

Допомога експертів неоціненна; кожен воєначальник має штаб, ректор вузу — учену раду, міністр — колегію; в окремих випадках утворюють разову групу експертів для розгляду конкретної ситуації.

Однак існують природні межі людських здібностей щодо сприйняття й обробки інформації. Роботу експертів лімітують не тільки міжособистісні відносини, але й внутрішні психологічні та фізіологічні причини. Виявляється, що людина одночасно може оперувати лише невеликою кількістю операндів (понять, ідей, моделей, альтернатив тощо) — психологи, кажучи про межу можливостей, іноді називають це законом “сім плюс-мінус два”. Крім того, стикаючись, наприклад, із багатокритеріальною задачею, експерт часто виявляє мінливість, непевність, нелогічність, прагнення до різкого спрощення задачі. Нарешті, у ряді випадків відіграє роль і низька швидкодія нервової та м’язової систем людини.

У всіх цих відношеннях можливості ЕОМ перевершують здатності людини, і виникає проста, але дуже плідна ідея створити єдину систему, яка об’єднала б достоїнства людини та машини й компенсувала їхні недоліки. Так, Н. Вінер відзначав: “Обчислювальна машина

дуже хороша у швидкій роботі, проведеній однозначно над повністю описаними даними. Обчислювальна машина не може зрівнятися з людською істотою в обробці ще не викристалізованих даних. Якщо назвати це інтуїцією, то я не сказав би, що інтуїція недоступна обчислювальній машині, але в неї вона менша, й економічно не вигідно змушувати машину робити те, що людина робить набагато краще” [25].

Навряд чи можливо, та й не варто створювати одну універсальну систему на всі випадки життя. На практиці проєктують людино-машинні системи, названі проблемно-орієнтованими. Навіть у порівняно конкретній сфері прийняття рішень створено багато типів систем залежно від типів задач вибору. Дотепер є кілька самостійних напрямків такого розвитку.

Пакети прикладних програм для вибору. Перший напрямок розвитку — розробка програм і пакетів програм для розв’язання конкретних добре визначених задач вибору. Прикладами можуть бути математичне забезпечення ЕОМ для статистичної обробки даних, системи програмного забезпечення оптимізаційних задач, сучасні бази даних тощо.

Бази знань, експертні системи. Другий напрямок — створення баз знань і експертних систем. Нині це, мабуть, головний напрямок руху до штучного інтелекту. Інтелектуальні властивості експертних систем можна реалізувати завдяки двом їх особливостям:

1) наявності отриманих від людини (експерта) знань у певній предметній області у формі фактів (предметного знання) й евристичних методів (емпіричних правил), які вводять у машинну базу даних і базу знань;

2) на відміну від програмних систем минулих поколінь машина оперує не тільки даними, але й поняттями, вираженими в термінах природної мови, а також знаннями про класи об’єктів, позначених цими термінами, і відношеннями між ними. Це досягається створенням спеціальних програм; розроблено спеціальну мову Пролог, операнди якої — як елементи даних, так і правила-оператори.

Експертні системи мають широкі перспективи: відомі їх численні реалізації в різноманітних предметних областях.

Якщо перший напрямок орієнтований на повну автоматизацію

добре формалізованих задач, другий — на створення систем, які нагромаджують досвід експертів і, власне кажучи, згодом замінять самих експертів, то в третьому сучасному напрямку розвитку людино-машинних систем вибору основний акцент зроблено на участь самої особи, яка приймає рішення, у спробах формалізувати задачу вибору, у самостійному порівнянні й оцінюванні за допомогою ЕОМ різних альтернатив різними способами.

Системи підтримки рішень. Третій напрямок представлено системами інтерактивної оцінки рішень і особливо “системами підтримки рішень”. Розробка систем підтримки рішень ведеться, зокрема, у рамках інтернаціонального проекту, виконуваного вченими багатьох країн під егідою Міжнародного інституту прикладного системного аналізу в Лаксембурзі (Австрія). Ідеологію цього підходу добре описав Г. Хатрі. Розглядаючи випадок, коли системний аналітик допомагає особі, яка приймає рішення, сформулювати однокритеріальну задачу оцінки альтернатив, він пише: “Без сумніву, робота тих, хто приймає рішення, була б легшою, якби можна було використовувати нехай приблизну, але єдину міру ефективності. Однак я наполягаю на тому, що такі процедури ставлять аналітика в положення, коли він неодноразово висловлює судження про призначення коефіцієнтів, які, власне кажучи, по праву мають бути призначені в процесі політичного винесення рішень, а не самим аналітиком. Ці призначення коефіцієнтів закладено в процедурах, використовуваних аналітиком, і рідко відомі тому, хто приймає рішення, чи зрозумілі йому.

Такі трюки в перспективі ведуть до дискредитації системного аналізу та до помітного відхилення від того, що являє собою його головне призначення: надавати тим, хто приймає рішення, альтернативні методи досягнення цілей, оцінювати та показувати всі основні взаємозв’язки між витратами й ефективностями для цих альтернатив” [182].

Системи підтримки рішень орієнтовані не на автоматизацію функцій особи, яка приймає рішення, а на надання їй допомоги в пошуку хорошого рішення. Тому в таких системах особливу увагу приділено діалогу та його “дружності” особі, котра приймає рішення. Звичайно, до математичного та програмного забезпечення систем підтримки

рішень належать і формалізовані процедури, які особа, що приймає рішення, може використовувати будь-якою потрібною їй мірою.

4.9. Вибір і відбір

Дотепер мова йшла про процедури одноразового вибору. Навіть тоді, коли доводилося проводити вибір у кілька етапів, ці етапи були проміжні, підготовчі перед останнім, остаточним вибором.

4.9.1. Повторний вибір

Можуть бути ситуації, у яких роблять вибір багато разів, причому кожен наступний вибір відбувається в умовах, які відрізняються від тих, у яких відбувався попередній. Це додає динаміки самому процесу вибору та його наслідкам. Конкретний характер змін, які відбуваються при цьому, залежить від багатьох факторів: самої природи множини альтернатив, ступеня впливу попереднього вибору на наступний, від того, наскільки та як саме враховано зміни, що відбулися, на черговому кроці вибору, тощо. При цьому можливі дуже різноманітні постановки задач, але далеко не всі з цих задач нині розглянуто.

Найдокладніше вивчено процеси прийняття статистичних рішень з адаптацією, тобто зворотним зв'язком за рішеннями — інакше кажучи, ухвалення рішення на черговому кроці з урахуванням попередніх рішень. Прикладом можуть бути радіолокаційні станції, які постійно досліджують задану зону, нагромаджують інформацію про перешкоди в зоні огляду та використовують її в процесі обробки прийнятих сигналів для виявлення цілей. Основний результат полягає в тому, що така адаптація може підвищити якість рішень. Інший приклад процесів багаторазового вибору дає природний відбір. Своєрідність таких процесів вивчає теорія еволюції, математична біологія.

Для нас основний інтерес становлять процеси свідомого вибору, тому, виконуючи багаторазовий вибір, ми приходимо, зокрема, до штучного відбору, селекції. Як показали дослідження А. Єфімова та

В. Кутєєва, тенденції, що виникають у ході селекції, сильно залежать від конкретних способів формування й поповнення добірних (“елітних”) груп [39, 40]. Навіть у найпростіших моделях селекції можна виявити цікаві ефекти в еволюції елітних груп. Їх потрібно враховувати, комплектуючи будь-які групи елементів, у чомусь кращих, ніж інші: у промисловості — у процесі виготовлення високосортної продукції; у сільському господарстві — займаючись виведенням високопродуктивних порід тварин і сортів рослин; в управлінській діяльності — комплектуючи групи виконавців особливо відповідальних справ тощо.

4.9.2. Основні ідеї теорії елітних груп

Розглянемо модель, запропоновану А. Єфімовим. Припустімо, що є якась сукупність елементів. Нехай цікаву для нас властивість елемента виражено якоюсь критеріальною величиною x ; для визначеності вважають, що чим більше значення x , тим краще, і що $0 \leq x \leq 1$. У вихідній сукупності є елементи з будь-якими значеннями величини x , і задача відбору виникає, якщо для досягнення якоїсь мети потрібно, щоб показник якості був не менший заданої величини $a < 1$. Припустімо, що з вихідної сукупності за допомогою певного еталона (носія величини a) відбирають задану кількість n елементів. Для загальності можна вважати, що процедура відбору зрідка дає збої, тому в елітну групу з невеликою ймовірністю β потрапляють і “бур’янисті” елементи, для яких $x \leq a$. З якоюсь кількістю “бур’янистих” елементів або без них, але елітну групу сформовано, і вона може почати виконувати завдання, поставлене перед нею. Якщо елементи для відбору вибрано випадково, $F(x)$ — функція розподілу якості x у сформованій елітній групі, $f(x)$ — відповідна їй щільність, то розподіл якості x у сформованій елітній групі характеризується щільністю

$$f_e(x) = \begin{cases} \frac{\beta}{F(a)} f(x), & \text{якщо } x < a, \\ \frac{1 - \beta}{1 - F(a)} f(x), & \text{якщо } x \geq a. \end{cases}$$

Очевидно, що середня якість \bar{x}_e елітної групи залежить від величин β й $F(a)$. Оскільки зазвичай значення β досить мале, а $F(a)$ — досить велике, тобто $\beta < F(a)$, то $\bar{x}_e > \bar{x}$. У разі $\beta = F(a)$ середня якість “еліти” не відрізняється від середньої якості всієї сукупності, а в разі $\beta > F(a)$ стає гіршою (ці випадки не становлять практичного інтересу).

Якщо через будь-які причини (старіння, руйнування, вилучення, відрахування, смерті тощо) якісь елементи вибувають з елітної групи, а її чисельність потрібно зберегти, то виникає задача повторного вибору елементів з основної сукупності, яка залишилася, до складу елітної групи. Відповідь на запитання, як змінюватимуться властивості елітної групи після багаторазового повторення цієї дії, залежить від низки обставин і може бути різною. Основні фактори, мабуть, такі:

- частка елітної групи в сукупності елементів, які хоча й відповідають вимогам елітності, але залишилися поза елітою (якщо в первинну елітну групу увійшли всі елементи, для яких $x > a$, то її доведеться поповнювати елементами, для яких $x \leq a$);
- характер зміни якості x кожного елемента згодом не тільки в елітній групі, але й в іншій сукупності (він може як залишатися постійним, так і змінюватися);
- правило відсіювання з елітної групи (чи відбувається це випадково, без урахування величини x , чи вибувають кращі або гірші елементи);
- правило включення нових елементів в елітну групу (відповідно до колишнього еталона a , чи зі зміненим еталоном, чи коли неможливо далі використовувати еталон після першого відбору);
- тимчасові відношення між моментами чергових поповнень елітної групи (ці відношення стають важливими в разі зміни якості x елементів у часі).

Різне поєднання цих умов спричинює виникнення великої кількості задач, які породжують різні типи еволюції якості елітної групи. Розглянемо деякі з них. В усіх випадках будемо вважати, що виділення елітної групи практично не позначається на властивостях сукупності, що залишилася (математично це відповідає, наприклад, скінченній чисельності елітної групи та незліченності вихідної

сукупності, що дає змогу вважати розподіл $F(x)$ незмінним у разі виділення елітних елементів).

4.9.3. Процедура “претендент — рекомендувач”

Як першу задачу розглянемо правило “претендент — рекомендувач”. Воно полягає в тому, що коли є вакансії в еліті, узятий навмання із загальної сукупності елемент (“претендента”) порівнюють із навмання взятим з еліти елементом (“рекомендувачем”); якщо значення x у претендента більше, ніж у рекомендувача, то претендент стає членом еліти; якщо менше, то утворюють нову пару “претендент — рекомендувач”. У цьому разі напрям зміни якості елітної групи залежить від того, які елементи (гірші чи кращі) довше існують у групі. Якщо довше “живуть” гірші (як кулька в підшипнику, що має найменший діаметр), то елітна група неминуче деградує, оскільки гірші частіше виступають як рекомендувачі. Навпаки, у разі збільшення часу $T(x)$ життя елемента зі зростанням величини x гірші елементи вибувають у першу чергу, рекомендувачами частіше стають елементи високої якості, що зумовлює неперервне зростання середньої якості елітної групи. Із певними обмеженнями на часові інтервали між замінами існують невироджені граничні розподіли якості x в елітній групі.

4.9.4. Процедури “прополювання” та “збирання врожаю”

Розглянемо тепер другу задачу — правило “прополювання”. Воно полягає у вилученні з елітної групи m найгірших елементів і заміні їх узятими навмання m елементами з основної групи. При цьому в еліту можуть потрапити як кращі елементи, ніж вилучені під час “прополювання”, так і гірші. Однак на наступному кроці “прополювання” знову видаляють m найгірших елементів елітної групи, тому в разі $m < n$ найгірші елементи не затримуються в еліті, а найкращі з нових залишаються. У результаті елітна група прогресує, її розподіл $F_k^e(x | m, n)$ зі зростанням кількості “прополювань” k сходиться до якогось граничного розподілу $F_\infty^e(x | m, n)$, що залежить

від величини m , $0 < m < n$. Зазначимо, що найкраща стратегія “прополовання”, яка дає найвищу граничну середню якість елітної групи, полягає у вилученні з елітної групи тільки одного найгіршого елемента на кожному кроці.

Процедуру, обернену до “прополовання”, коли з групи вилучають t найкращих елементів, А. Єфімов називає **правилом “збирання врожаю”**. При цьому ефекти протилежні спостережуваним у разі “прополовання”: найбільшої шкоди групі завдає вилучення на кожному кроці тільки одного найкращого елемента.

Процедура “претендент — рекомендувач” реалізує в певному розумінні однакове поводження з вихідною сукупністю та з елітною групою. У процедурах “прополовання” та “збирання врожаю” передбачено, що основна активність спостерігається всередині елітної групи.

4.9.5. Процедура “делегування”

Розглянемо тепер можливість зовнішньої активності у формуванні еліти. Варіант такої процедури, яку називають **правилом “делегування”**, полягає ось у чому:

- 1) з вихідної сукупності випадково вибирають N елементів — вибірку, що делегує;
- 2) вибірку, що делегує, упорядковують за величиною x ;
- 3) елемент із найбільшим рангом зараховують у формовану елітну групу.

На етапі формування елітної групи процедуру повторюють n разів — стільки, скільки вакансій потрібно заповнити. За допомогою теорії порядкових статистик можна пов’язати величини a , β й N :

$$N \geq \frac{\ln \beta}{\ln F(a)};$$

отже, чим вищі вимоги до якості елітної групи, тим більшим має бути обсяг вибірки, що делегує. Принципова відмінність “делегування” від процедури “претендент — рекомендувач” полягає у відмові від порівняння делегатів із членами еліти. Окрім того, виявляється, що “делегування” не тільки дає змогу сформувати еліту будь-якої

потрібної якості, але й зберегти елітну групу від деградації навіть у разі більшої життєздатності поганих елементів.

Наведені моделі мають певні аналогії в суспільних процесах, однак вони занадто прості, щоб можна було говорити про кількісну теорію соціальних систем. А. Єфімов пише: “По-перше, таку теорію ще непогано було б створити об’єднаними зусиллями соціологів, економістів, юристів і математиків. Поки що є лише кілька найпростіших моделей. Їх аналіз показує, що побудова елітних груп, не підданих деградації, у принципі можлива. Це — по-друге, і це обнадіює” [38].

Розглянемо схему, на якій проілюстровано всі згадані вище задачі вибору, зазначено їх спільні властивості та розбіжності в ієрархічній класифікації (рис. 15).

Із цієї схеми видно, що багато задач іще взагалі не розглянуто, оскільки ієрархія далеко не повна. Причини того, що якісь задачі не ввійшли в схему, можуть бути різними.

Запитання та завдання до розділу 4

1. Що таке поліпшення систем?
2. Чим проектування систем відрізняється від їх поліпшення? Наведіть приклади.
3. Як можна охарактеризувати підходи реаліста й ідеаліста до проектування систем?
4. Якими принципами потрібно керуватися в проектуванні систем?
5. Що таке вибір?
6. Що таке критерій переваги? Які етапи передують процесу вибору?
7. Наведіть приклади постановки задач вибору.
8. Назвіть три основні мови опису вибору.
9. Які ви знаєте способи зведення багатокритеріальної задачі до однокритеріальної? Які в них переваги та недоліки?
10. Що таке умовна максимізація? Чим вона відрізняється від простої максимізації критерію?
11. У чому полягає пошук альтернативи із заданими властивостями? Коли його виконують?

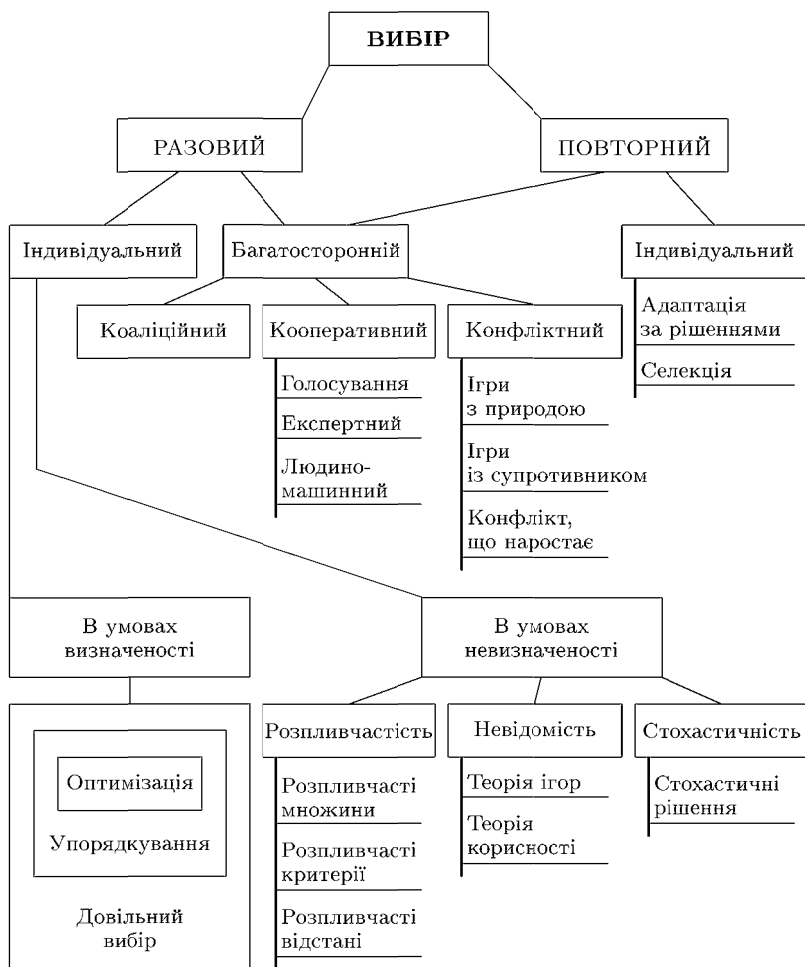


Рис. 15. Взаємозв'язок задач вибору

12. Які переваги має визначення множини Парето в разі багатокритеріального вибору?

13. Дайте класифікацію задач вибору.
14. Які способи задання бінарних відношень ви знаєте?
15. Якими властивостями характеризуються відношення еквівалентності, порядку та домінування?
16. Наведіть приклади графів переваг.
17. Що таке функція корисності?
18. Які проблеми виникають під час оцифрування порядкових шкал?
19. Охарактеризуйте мову функцій вибору.
20. Які є обмеження на функції вибору?
21. Сформулюйте аксіоми спадкування, згоди, відкидання, Плотта й переваги. Наведіть приклади.
22. Чим відрізняється груповий вибір від багатокритеріального?
23. Назвіть основні правила голосування.
24. Сформулюйте теорему Фішберна.
25. У чому полягає парадокс Ерроу?
26. Як впливає на голосування те, що немає властивості транзитивності?
27. Які особливості вибору в умовах невизначеності?
28. Наведіть приклади критеріїв порівняння альтернатив у разі невизначеності наслідків.
29. Чим максимінний критерій відрізняється від мінімаксного?
30. У чому полягає особливість застосування критерію Гурвіца?
31. Що таке теорія ігор?
32. Чим характеризується вибір в умовах статистичної невизначеності?
33. Наведіть схему прийняття статистичних рішень.
34. Які основні напрями математичної статистики ви знаєте? У чому полягають їх особливості?
35. Які переваги надає використання робастної статистики?
36. Чи потрібно дотримуватися правил “статистичної техніки безпеки”? Чому?
37. Чим характеризується вибір у розпливчастій ситуації?
38. Наведіть переваги оптимізаційного підходу.
39. Чому оптимізаційний підхід обмежений? Наведіть приклади.
40. У яких випадках слід надавати перевагу субоптимізації? Чому?

Розділ 4. Вибір (прийняття рішень)

41. Якими правилами слід користуватися для досягнення кращих субоптимізацій?
42. У чому полягають експертні методи вибору? Коли їх застосовують?
43. Які ви знаєте методи обробки думок експертів?
44. У чому полягає метод “Дельфі”? У чому його перевага? Коли його доцільно застосовувати?
45. Яка роль людино-машинних систем у виборі?
46. Які особливості баз знань і експертних систем роблять доцільним їх використання?
47. Що таке системи підтримки рішень?
48. У чому відмінність вибору від відбору?
49. Наведіть основні ідеї теорії елітних груп.
50. Які процедури відбору пропонує теорія елітних груп? Чим вони відрізняються?
51. Сформулюйте основні положення теорії елітних груп.

Розділ 5

ПРОЦЕДУРИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

5.1. Аналіз і синтез у системних дослідженнях

Єдність аналізу та синтезу в людській свідомості дає змогу зрозуміти навколишній світ. Це стосується всіх галузей знань і, зокрема, системного аналізу. Далі розглянемо технічні аспекти аналітичного та синтетичного методів дослідження систем. Буде акцентовано увагу на тім, як виконуються операції поділу цілого на частини й об'єднання частин у ціле та чому вони виконуються саме так. Інакше кажучи, ми обговоримо, у якій мірі нині можна алгоритмізувати аналіз і синтез.

5.1.1. Поєднання аналізу та синтезу в системному дослідженні

Багато філософів і натуралістів зауважували, що роль синтезу не зводиться тільки до “складання деталей”, отриманих у процесі аналізу. Серед фахівців із системного аналізу особливо наполегливо наголошував на цьому Р. Акофф. Він зазначає, що дуже важливо цілісність системи; вона порушується під час аналізу, бо після

розчленування системи втрачаються істотні властивості не тільки самої системи, а і її частин, відділених від неї. Тому результат аналізу — лише розкриття структури, знання про те, як система працює, але не розуміння того, чому й навіщо вона це робить. Р. Акофф відзначає: “Синтетичне мислення вимагає пояснити поведінку системи. Воно істотно відрізняється від аналізу. На першому кроці аналізу річ, яку потрібно пояснити, розділяють на частини; у синтетичному мисленні її слід розглядати як частину більшого цілого. На другому кроці аналізу пояснюють зміст частини; у синтетичному мисленні пояснюють ціле, що утримує нашу річ. На останньому кроці аналізу знання про частини агрегують у знання про ціле; у синтетичному мисленні розуміння утримувального цілого дезагрегують для пояснення частин. Це роблять за допомогою розкриття їх ролей або функцій у цілому. Синтетичне мислення відкриває не структуру, а функцію; воно відкриває, чому система працює так, а не те, як вона робить це” [181].

Отже, не тільки аналітичний метод неможливий без синтезу (на цьому етапі частини агрегують у структуру), але й синтетичний метод неможливий без аналізу (потрібна дезагрегація цілого для пояснення функцій частин). Аналіз і синтез доповнюють, але не заміняють один одного. Системне мислення поєднає обидва зазначені методи.

5.1.2. Особливості синтетичних методів

По-перше, аналітичний метод дає найвищі результати, якщо ціле можна розділити на незалежні одна від одної частини, бо в цьому разі окремий їх розгляд дає змогу скласти правильне уявлення про їх внесок у загальний ефект. Однак ситуація, коли система являє собою “суму” своїх частин, — не правило, а найрідкісніший виняток. Правило ж полягає в тому, що внесок частини в загальносистемний ефект залежить від внесків інших частин. Тому, наприклад, якщо змусити кожен частину функціонувати щонайкраще, то в цілому ефект не обов’язково буде найвищим. Відібравши найкращі у світі карбюратор, двигун, фари, колеса тощо, ми не тільки не одержимо найкращого автомобіля, але взагалі не зможемо зібрати машину, тому

що деталі машин різних марок не підійдуть одна до одної. Отже, аналізуючи “неадитивні” системи, варто розглядати не окремі частини, а їх взаємодію. Це істотно складніше завдання. Наприклад, керування “неадитивною” системою виявиться ефективнішим, якщо керувати не діями її окремих частин, а взаємодіями між ними.

По-друге, ідеал, кінцева мета аналітичного методу — виявлення причинно-наслідкових відношень між розглянутими явищами. Щось уважають пізнаним, цілком зрозумілим тоді, коли відома його причина (сукупність умов, необхідних і достатніх для реалізації наслідку). Однак це далеко не завжди досяжно. Навіть у разі причинно-наслідкового опису (тобто коли умови, що входять у причину, дійсно перелічувані), потрібно вилучити все інше. Для причинно-наслідкового відношення не існує поняття навколишнього середовища, тому що для наслідку не потрібно нічого, крім причини. Наприклад, закон вільного падіння тіл правдивий, якщо немає ніяких інших сил, крім сили тяжіння. Однак коли ми маємо справу зі складними системами, виключити “непотрібні”, “нецікаві” взаємодії буває неможливо не тільки практично, але й абстрактно (якщо потрібно зберегти адекватність моделі). Є два способи описати таку ситуацію. Один полягає у відображенні “безпричинної” компоненти поведінки системи, або “об’єктивної випадковості”, або “суб’єктивної невизначеності” (що виникає через незнання), або їх поєднання. Другий впливає з синтетичного, експансіоністського методу й полягає у визнанні того, що відношення “причина — наслідок” — не єдино можливий і прийнятний опис (пояснення) взаємодії. Адекватнішою моделлю взаємодії виявляється відношення “продуцент — продукт”, яке характеризується тим, що продуцент — необхідна, але не достатня умова виникнення продукту. Отже, для одержання продукту потрібні й інші умови, що й утворюють навколишнє середовище. Причинне, вільне від середовища пояснення — граничний випадок продуцентного, ідеал, до якого можна наближатися, але досягти якого можна й потрібно не завжди.

Хоч би як то не було, і в аналітичному, й у синтетичному підході настає момент, коли потрібно розкласти ціле на частини чи об’єднати частини в ціле. Ці операції називають відповідно **декомпозицією** й **агрегуванням**. Далі розглянемо технічні аспекти їх виконання.

5.2. Моделі систем як основи декомпозиції

Основна операція аналізу — поділ цілого на частини. Задача розпадається на підзадачі, система — на підсистеми, цілі — на підцілі і т. д. У разі потреби цей процес повторюють, що дає ієрархічні деревоподібні структури. Зазвичай (якщо задача не чисто навчальна) об'єкт аналізу складний, слабо структурований, погано формалізований, тому операцію декомпозиції виконує експерт. Якщо доручити аналіз того самого об'єкта різним експертам, то отримані деревоподібні списки будуть різнитися. Якість побудованих експертами дерев залежить як від їхньої компетентності в певній галузі знань, так і від застосовуваної методики декомпозиції.

Зазвичай експерт легко поділяє ціле на частини, але йому складно довести повноту та ненадлишковість пропонованого набору частин. Прагнучи перейти від чисто евристичного, інтуїтивного підходу до більш усвідомленого, алгоритмічного виконання декомпозиції, ми повинні пояснити, чому експерт розділяє ціле саме так, а не інакше й саме на певну, а не більшу чи меншу кількість частин. Пояснення полягає в тому, що *основа будь-якої декомпозиції — модель розглянутої системи.*

5.2.1. Змістовна модель як основа декомпозиції

Операція декомпозиції — це зіставлення об'єкта аналізу з якоюсь моделлю, виділення в ньому того, що відповідає елементам узятій моделі. Тому на запитання, скільки частин має бути після декомпозиції, можна дати таку відповідь: стільки, скільки елементів містить модель, узята як базова (модель-основа). Питання про повноту декомпозиції — це питання завершеності моделі.

Об'єкт декомпозиції потрібно зіставляти з кожним елементом моделі-основи. Однак і сама модель-основа може з різною мірою деталізації відображати досліджуваний об'єкт. Наприклад, у системному аналізі часто доводиться використовувати модель типу “життєвий цикл”, яка дає змогу розкласти аналізований період

часу на послідовні етапи від виникнення об'єкта до його зникнення. За допомогою такої декомпозиції життя людини можна поділити на молодість, зрілість і старість, але можна виділяти й дрібніші етапи, наприклад дитинство, отрочество та юність. Така сама розмаїтість може бути й у разі декомпозиції життєвого циклу будь-якої проблеми. Розбиття на етапи дає уявлення про послідовність дій, починаючи з виявлення проблеми й закінчуючи її ліквідацією.

Виявивши, що декомпозицію можна виконати за допомогою якоїсь моделі, крізь яку ми ніби розглядаємо розчленоване ціле, далі потрібно відповісти на природні запитання.

1. Моделі якої системи слід брати як основу декомпозицій?
2. Яку саме модель треба брати?

Як було зазначено вище, основа декомпозиції — модель розглянутої системи. Але яку саме систему слід під цим розуміти? Будь-який аналіз проводять для чогось, і саме мета аналізу визначає, яку систему потрібно розглядати. Система, з якою пов'язаний об'єкт аналізу, і система, за моделями якої виконують декомпозицію, не обов'язково збігаються, і хоча вони мають певне відношення одна до одної, це відношення може бути будь-яким: одна з них може бути підсистемою чи надсистемою іншої, вони можуть бути й різними, але якомсь пов'язаними системами.

Іноді як основу декомпозиції корисно не тільки перебирати різні моделі цільової системи, але й брати спочатку моделі надсистеми, потім самої системи та, нарешті, підсистем. Можна також розглядати й таку процедуру аналізу, коли перед кожним черговим актом декомпозиції заново постає питання не тільки про те, за якою моделлю проводити декомпозицію, але й про те, чи не варто взяти модель іншої системи, ніж раніше.

Однак найчастіше в практиці системного аналізу як глобальний об'єкт декомпозиції беруть щось таке, котре відноситься до системи — носія проблеми й до досліджуваної проблеми, а як основи декомпозиції беруть моделі системи, яка розв'язує проблему.

Які ж моделі слід брати як основу декомпозиції? Насамперед нагадаємо, що попри практично неозоре різноманіття моделей формальних типів моделей небагато: це моделі “чорного ящика”, складу, структури, конструкції (структурної схеми) — кожна в статичному

чи динамічному варіанті. Це дає змогу організувати потрібний перебір типів моделей, повний або скорочений залежно від потреби.

5.2.2. Зв'язок між формальною та змістовною моделями

Основою для декомпозиції може бути тільки конкретна, змістова модель розглянутої системи. Вибір моделі лише підказує, якого типу має бути модель-основа; формальну модель потрібно наповнити змістом, щоб вона стала основою для декомпозиції. Це дає змогу трохи прояснити питання про повноту аналізу, що завжди виникає в явному чи неявному вигляді.

Повнота декомпозиції впливає з повноти моделі-основи, а це означає, що насамперед варто подбати про повноту формальної моделі. Завдяки формальності, абстрактності такої моделі часто можна домогтися її абсолютної повноти.

Отже, повнота формальної моделі має бути предметом особливої уваги. Тому одна з важливих задач інформаційного забезпечення системного аналізу полягає в нагромадженні наборів повних формальних моделей (у штучному інтелекті такі моделі називаються **фреймами**).

5.2.3. Проблема повноти моделей

Повнота формальної моделі — неодмінна, але не достатня умова для повноти декомпозиції. В остаточному підсумку все залежить від повноти змістовної моделі, побудованої “за образом” формальної моделі, але не тотожної їй. Фрейм лише привертає увагу експерта до потреби розглянути, що саме в реальній системі відповідає кожному з його складових елементів, а також вирішити, які з цих елементів потрібно включити в змістовну модель. Це дуже відповідальний момент (адже те, що не потрапляє в модель-основу, не з'явиться в подальшому аналізі) і дуже важкий (заздалегідь не завжди очевидно, що певний компонент має увійти в основу).

Питання достатнього ступеня деталізації змістовних моделей на відміну від фреймових завжди залишається відкритим. Щоб

зберегти повноту й можливість розширення змістовної моделі, можна рекомендувати виконувати логічне замикання переліку її елементів компонентом “усе інше”. Цей компонент зазвичай “мовчазний”, бо до нього віднесено все, що здається несуттєвим, але він постійно нагадує експертові, що, можливо, він не врахував щось важливе.

Із проблемою ступеня деталізації моделі-основи пов'язане питання зручності — важко формалізованого, але цілком відчутного поняття. Пояснимо це на конкретному прикладі. Для аналізу проблем викладання потрібна модель педагогічного процесу. Як фрейм для неї можна взяти модель діяльності взагалі (рис. 16), відповідно інтерпретувавши вхідні елементи. За допомогою такої моделі педагогічного процесу вдалося впорядкувати й зіставити низку сучасних напрямків у методичній роботі вищої школи.

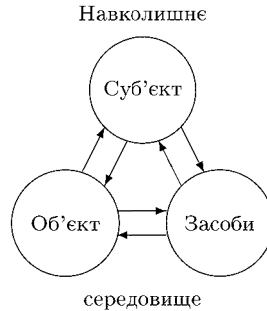


Рис. 16. Загальна схема діяльності

Однак для аналізу організаційних аспектів навчального процесу у вищих закладах освіти зручніша модель, у якій із фреймового елемента “засоби” як окремі елементи виділено не тільки інформаційний засіб “досліджуваний предмет”, але й “технічні засоби навчання (ТЗН)” (рис. 17).

Наприклад, можна вгледіти зв'язок граней піраміди на рис. 17 із такими організаційними аспектами навчального процесу, як аудиторні практичні заняття, самостійна робота студентів, методична

робота викладачів, лекційне викладання. Це зайвий раз підкреслює цільове призначення моделей: зміна мети моделювання потребує зміни моделі.

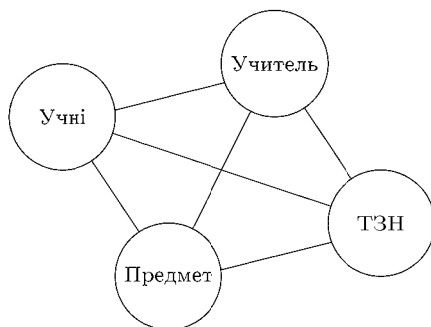


Рис. 17. Схема компонентів навчального процесу

5.3. Алгоритмізація процесу декомпозиції

Вище ми розглянули деякі аспекти того, як експерт виконує одиничний акт розкладання цілого на частини. Тепер дамо подальші рекомендації щодо виконання всього багатоступінчастого процесу декомпозиції — від початкової декомпозиції першого рівня до останнього, який завершує певний етап аналізу рівня.

5.3.1. Компроміси між повнотою та простотою

Почнемо з обговорення вимог до деревоподібної структури — підсумку роботи всього алгоритму. Кількісно вони зводяться до двох суперечливих принципів: *повноти* (проблему потрібно розглядати максимально всебічно й докладно) і *простоти* (усе дерево має бути максимально компактним — “ушир” і “всерединою”). Зазначені принципи стосуються кількісних характеристик (розмірів) дерева.

Компроміси між ними впливають із якісної вимоги — основної мети: звести складний об'єкт аналізу до кінцевої сукупності простих підоб'єктів або (якщо це не вдається) з'ясувати конкретну причину непереборної складності (рис. 18).

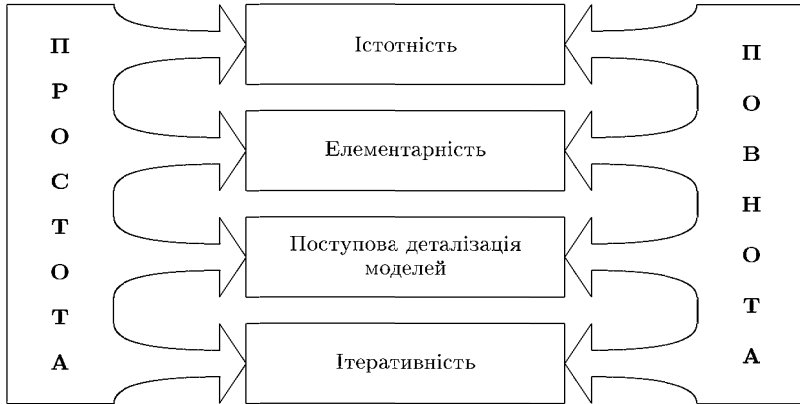


Рис. 18. Схема компромісів між принципами простоти та повноти аналізу

Принцип простоти вимагає зменшувати розміри дерева. Ми вже знаємо, що розміри “вшир” визначає кількість елементів моделі — основи декомпозиції. Тому принцип простоти змушує брати якомога компактніші моделі-основи, а принцип повноти, навпаки, — якомога розвинутіші, докладніші. Компромісу можна досягти за допомогою поняття *істотності*: у модель-основу включають лише компоненти, істотні стосовно мети аналізу (**релевантні**). Як бачимо, це поняття неформальне, тому вирішення питання про те, що в даній моделі істотне, а що — ні, покладено на експерта. Щоб полегшити його роботу, в алгоритмі слід передбачити можливості внесення (у разі потреби) виправлень і доповнень у модель-основу. Одна з таких можливостей полягає в доповненні елементів, які експерт уважав істотними, іще одним елементом “усе інше”; експерт може не використовувати

його для декомпозиції, але він постійно будить в експерта сумнів у повноті запропонованої ним моделі. Інша можливість полягає в розукрупненні, розбитті окремих елементів моделі-основи в разі потреби, яка може виникнути на наступних стадіях аналізу.

Перейдемо тепер до питання про розміри дерева “всередину”, тобто про кількість “поверхів” дерева, рівнів декомпозиції. Звичайно, бажано, щоб вона була невеликою (принцип простоти), але принцип повноти вимагає, щоб у разі потреби можна було продовжувати декомпозицію як завгодно довго до ухвалення рішення про її припинення вздовж певної гілки (різні гілки іноді можуть мати різну довжину). Таке рішення приймають у декількох випадках. Перший, якого ми зазвичай прагнемо, настає, коли композиція дала результат (підмету, підфункцію, підзадачу тощо), який уже не потрібно розкласти, тобто простий, зрозумілий, реалізований, забезпечений; назвемо його **елементарним**. Для деяких задач поняття елементарності можна конкретизувати до формальної ознаки, а в інших задачах аналізу воно залишається неформальним, і перевірку фрагментів декомпозиції на елементарність доручають експертам.

Неелементарний фрагмент піддають подальшій декомпозиції згідно з іншою (не використовуваною раніше) моделлю-осною. Очевидно, що ефективність роботи експерта, розміри отриманого дерева та в остаточному підсумку якість аналізу певною мірою залежать від послідовності, у якій експерт використовує наявні моделі. Наприклад, в алгоритмі декомпозиції, вбудованому в комп’ютерну діалогову систему, заради зручності експерта має бути передбачене пред’явлення моделей у визначеній самим експертом послідовності. Водночас має бути й режим поради експертові, у якому комп’ютер рекомендує йому певний порядок взяття основ, і це спрощує справу.

Якщо експерт перебрав усі фрейми, але не досяг елементарності на якійсь гілці дерева, то насамперед висувають припущення, що подальша декомпозиція може все-таки довести аналіз до одержання елементарних фрагментів, і варто надати експертові можливість продовжити декомпозицію, уводячи нові елементи в модель-основу та продовжуючи декомпозицію за ними. Оскільки нові істотні елементи можна отримати тільки розщепленням уже наявних, в алгоритм декомпозиції має бути закладено можливість повернення до ви-

користаних раніше основ. При цьому немає потреби розглядати заново всі елементи моделі, тому що оброблюваний фрагмент належить гілці, яка відповідає тільки одному елементу кожної основи. Тоді слід розглянути можливість розщеплення саме цього елемента. На цій самій стадії можна рекомендувати експертові вирішити, чи не настав час виділити з “усього іншого” та додати до істотних іще один елемент. Пройшовши таким способом усю передісторію неелементарного фрагмента, одержимо нові основи для його декомпозиції, а виходить, і можливість продовжити аналіз, сподіваючись досягти елементарності вздовж усіх гілок.

Отже, зазначена *ітеративність алгоритму декомпозиції додає йому варіабельності, можливості скористатися моделями різної детальності на різних гілках, поглиблювати деталізацію скільки завгодно (наскільки це потрібно).*

5.3.2. Типи складності

Незважаючи на можливості, надані зміною моделей та ітеративністю, може настати момент, коли експерт визнає, що його компетентності недостатньо для подальшого аналізу певного фрагмента й варто звернутися до експерта вищої кваліфікації. Власне кажучи, причина складності такого типу — неінформованість (“неуцтво”), яку можна подолати за допомогою інформації, розосередженої по різних експертах і джерелах. Випадок, коли декомпозиція закінчується елементарними фрагментами на всіх гілках дерева, найпростіший. Не має значення, один чи декілька експертів довели аналіз до кінця, а важливо, що це можливо; отже, первісна складність спричинена не стільки браком інформації, скільки великою розмірністю проблеми.

У дійсно складних випадках одержання цілком завершеної декомпозиції має не тільки радувати, але й насторожувати: чи не пов’язана реальна складність із пропущеною гілкою дерева, яку експерти вважали несуттєвою? Про безпеку неповноти аналізу слід пам’ятати завжди. Один зі способів (він не дає повної гарантії, але іноді корисний) — пропонувати експертам не тільки знаходити доказ на користь розглянутого проекту, але й обов’язково зазначати можливі

негативні наслідки. Зокрема, у класифікатор виходів (кінцевих продуктів) будь-якої системи крім корисних продуктів обов'язково потрібно включати відходи.

Якщо неможливо довести декомпозицію до одержання елементарного фрагмента, що або евристично констатовано експертом на ранніх стадіях аналізу, або виявляється у вигляді “затягування” аналізу вздовж якоїсь гілки, то це не негативний, а також позитивний результат. Хоча при цьому складність не зникає цілком, але її сфера звужується, виявляється й локалізується її істинна причина. Знання про те, чого саме ми не знаємо, можливо, не менш важливе, ніж саме позитивне знання. Щоправда, навколо таких результатів часто виникає атмосфера неприйняття. Навіть фізики, говорячи: “Негативний результат — теж результат”, частіше бажають просто втішити колег-невдах. Так було на початку ХХ ст. з “ультрафіолетовою катастрофою” до виникнення квантової механіки; схожа ситуація тепер склалася з поясненням природи кульової блискавки. Однак якщо в науці складність через незрозуміння розцінюють як тимчасово непереборне й припустиме явище, то в управлінні (тобто ділових, адміністративних, політичних питаннях) його часто сприймають як неприйнятний варіант, який призводить до неприпустимого зволікання з прийняттям рішення. Чи не тому саме в управлінні нерідко приймають інтуїтивні та вольові рішення? І чи не внаслідок негативного (у цілому) досвіду таких рішень останнім часом спостерігається швидке зближення способу мислення керівників і вчених, підвищення ролі наукових методів в управлінні?

Отже, якщо розглядати аналіз як спосіб подолання складності, то повне зведення складного до простого можливе лише в разі складності через неінформованість; у разі складності через незрозуміння аналіз не ліквідує складності, проте локалізує її, дає змогу визначити, яких саме даних бракує. Тому (з певною натяжкою) можна сказати, що метод декомпозиції не дає нових знань, а лише “витягає” знання з експертів, структурує й організує їх, оголюючи можливу недостатчу знань у вигляді “дірок” у цій структурі. Річ у тім, що в дійсності нове знання — це не тільки виявлення недостатчі конкретних знань (раніше нам було відомо, чого саме ми не знали), але й інакше скомбіновані фрагменти старих знань.

5.3.3. Алгоритм декомпозиції

Алгоритм декомпозиції подано у вигляді блок-схеми (рис. 19).

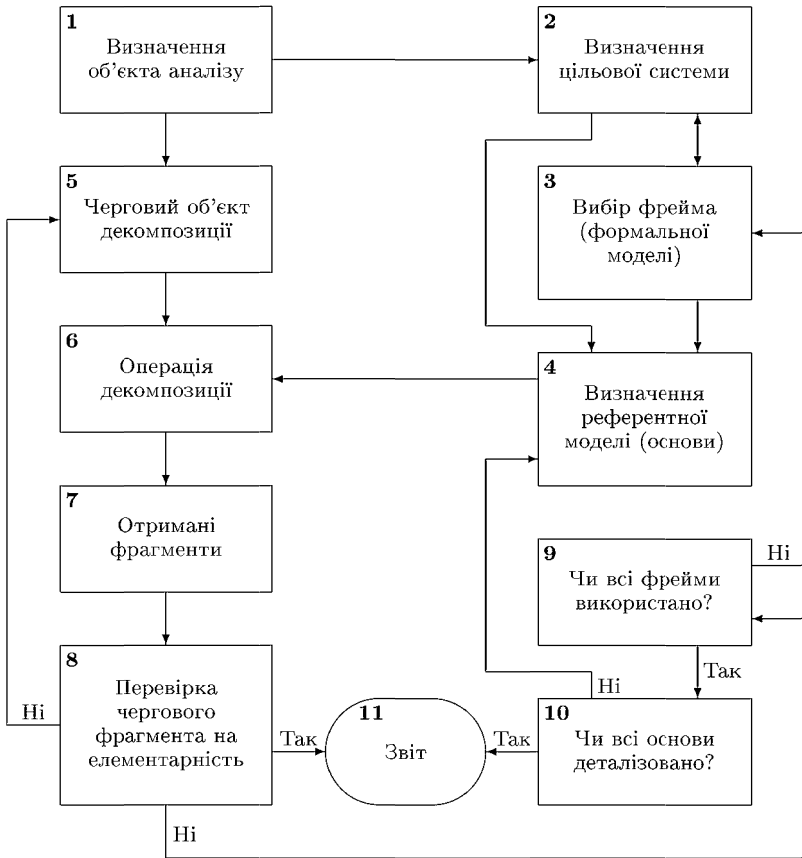


Рис. 19. Укрупнена блок-схема алгоритму декомпозиції

Блок 1. Об'єктом аналізу може стати все, що завгодно, — будь-

який вислів, для розкриття змісту котрого потрібно структурувати його. На визначення об'єкта аналізу іноді витрачають дуже багато зусиль. Коли мова йде про дійсно складну проблему, її складність виявляється й у тім, що відразу важко правильно сформулювати об'єкт аналізу. Навіть у такій ґрунтовно регламентованій документами сфері, як робота міністерства, для формулювання глобальної мети очолюваної ним галузі потрібно кілька разів уточнювати й узгоджувати її, перш ніж вона стане об'єктом аналізу. Це стосується не тільки формулювань мети, але й визначення будь-якого вислову, який потрібно аналізувати. Від правильності вибору об'єкта аналізу залежить, чи дійсно ми будемо робити те, що потрібно.

Блок 2. Цей блок визначає, навіщо потрібно те, що ми будемо робити. Цільова система — та, в інтересах якої виконують аналіз. Знову зазначимо, що неможливо більш формально визначити цільову систему, тому що багато чого залежить від конкретних умов.

Блок 3. Цей блок містить набір фреймових моделей і рекомендовані правила їх перебору чи звертання до експерта з проханням самому визначити черговий фрейм.

Блок 4. Експерт будує змістовну модель, за якою буде зроблено декомпозицію, на основі вивчення цільової системи. Дуже корисними для цього можуть бути різні класифікатори в певних областях знань, а також інформація, зібрана в довідниках і спеціальних енциклопедіях.

Блоки 5–10 було достатньо пояснено раніше.

Блок 11. Остаточний результат аналізу оформлюють у вигляді дерева, кінцеві фрагменти гілок якого — або елементарні фрагменти, або ті, які експерт визнав складними, але які не можна далі розкласти. Причини такої складності можуть критись або в обмеженості знань експерта чи групи експертів (складність через незрозуміння), або в тім, що потрібні знання існують, але їх іще не об'єднано в пояснювальні моделі (складність через незрозуміння), або в принциповому браку потрібних знань (складність через незнання).

Блок-схема, зображена на рис. 19, звичайно, занадто укрупнена; вона призначена для роз'яснення лише основних ідей алгоритму декомпозиції. Якщо потрібна більша конкретизація формальних операцій в алгоритмі, то можна звернутися до блок-схеми, зобра-

5.4. Агрегування, емерджентність, внутрішня цілісність систем

женої на рис. 20.

Отже, один зі способів спрощення складного — метод декомпозиції — полягає в розкладенні складного цілого на все мілкіші (та простіші) частини. Компромісу між простотою та повнотою при цьому досягають за допомогою понять істотності, елементарності, поступової деталізації моделей та ітеративності.

5.4. Агрегування, емерджентність, внутрішня цілісність систем

Операція агрегування, тобто об'єднання декількох елементів у єдине ціле, протилежна до декомпозиції. Агрегування може бути потрібне для різних цілей і супроводжуватися різними обставинами, тому є різні (іноді принципово різні) його способи. Однак у всіх **агрегатів** (так називають результат агрегування) є одна загальна властивість, яка одержала назву **емерджентності**. Вона притаманна всім системам, і внаслідок її важливості зупинімося на ній докладніше.

5.4.1. Емерджентність як прояв внутрішньої цілісності системи

Об'єднані елементи, що взаємодіють, утворюють систему, якій властиві не тільки зовнішня цілісність, відокремленість від навколишнього середовища, але й внутрішня цілісність, природна єдність. Якщо зовнішню цілісність відображає модель “чорного ящика”, то внутрішня пов'язана зі структурою системи. Найяскравіший прояв внутрішньої цілісності системи полягає в тому, що властивості системи — не лише сума властивостей її складових. Система — це щось більше; вона має такі властивості, яких немає в жодній з її частин, узятій окремо. Модель структури відображає насамперед зв'язність елементів, їх взаємодію. Ми ж прагнемо зараз зробити акцент на тому, що *в результаті об'єднання частин у ціле виникає щось якісно нове, таке, чого не було й не могло бути без цього об'єднання.*

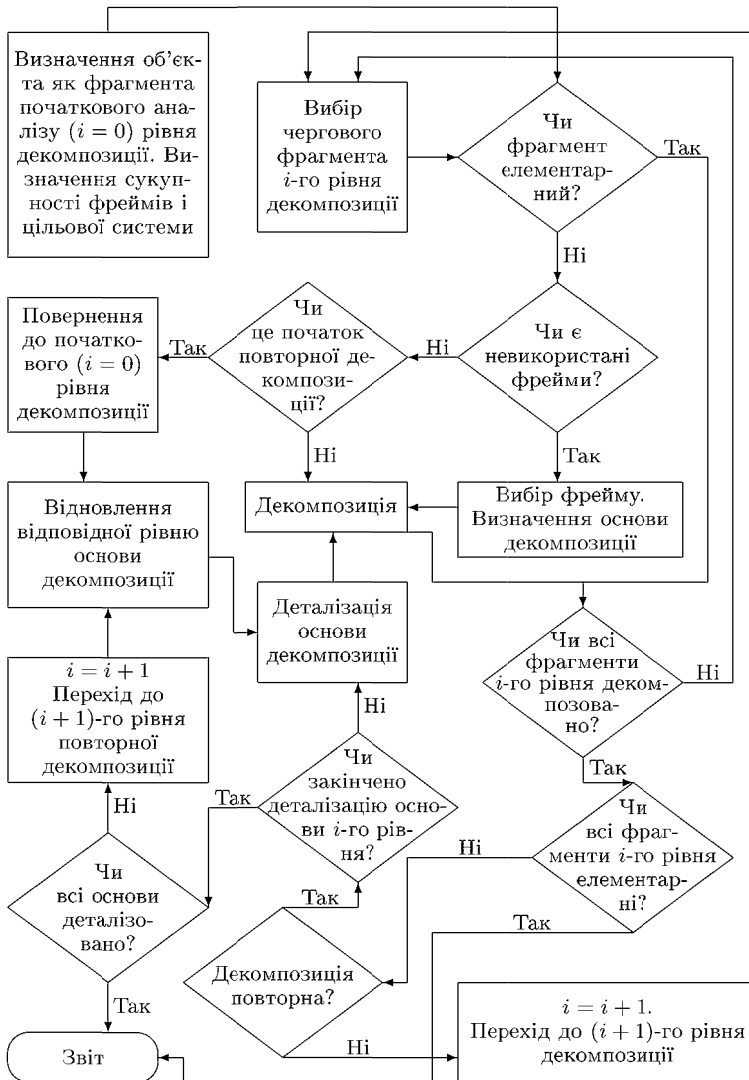


Рис. 20. Розгорнена блок-схема алгоритму декомпозиції

5.4.2. Емерджентність як результат агрегування

Таке “раптове” виникнення нових якостей системи дало підставу назвати цю властивість емерджентністю. Англійський термін “emergence” означає виникнення з нічого, раптову появу, несподівану випадковість. У спеціальній літературі російською й українською мовами не було спроб знайти власний еквівалентний термін. Однак не можна трактувати це поняття буквально. Хоч би які дивні властивості не виникали після об’єднання елементів у систему, нічого містичного, що взялося “нізвідки”, тут немає: нові властивості виникають унаслідок конкретних зв’язків між конкретними елементами. Інші зв’язки дають інші властивості, не обов’язково так само очевидні.

Властивість емерджентності визнано й офіційно: під час державної експертизи винаходів патентоспроможним визнають і нове, раніше невідоме поєднання добре відомих елементів, якщо при цьому виникають нові корисні властивості.

Виникнення якісно нових властивостей у разі агрегування елементів — частинний, але яскравий прояв загального закону діалектики — переходу кількості в якість. Чим більше відрізняються властивості сукупності від суми властивостей елементів, тим вища організованість системи. Так, фізик А. Еддінгтон писав: “Нерідко думають, що, вивчивши один якийсь об’єкт, знають уже все про два точно таких самих об’єкти, тому що “два” — це “один і один”. При цьому, однак, забувають, що потрібно досліджувати ще й те, що криється за цим “і”. Вивченням цього “і”, тобто розглядом організації, займається, можна сказати, вторинна фізика” [180].

Кібернетик У. Ешбі показав, що *в системі тим більше можливостей у виборі поведінки, чим вищий ступінь погодженості поведінки її частин.*

Отже, агрегування частин у єдине ціле зумовлює виникнення нових якостей, які не зводяться до якостей окремих частин. Ця властивість — прояв внутрішньої цілісності систем, чи, як іще говорять, **системотвірний фактор**. Нові якості систем дуже сильно залежать від характеру зв’язків між частинами й можуть варіюватися

в дуже широкому діапазоні — від повного узгодження до повної незалежності частин.

5.5. Види агрегування

Як і декомпозиція, техніка агрегування ґрунтується на використанні моделей досліджуваної чи проектованої системи. Саме обрані нами моделі жорстко визначають, які частини мають увійти до складу системи (модель складу) і як вони мають бути пов'язані між собою (модель структури). Унаслідок різних умов і цілей агрегування потрібно використовувати різні моделі, від чого, у свою чергу, залежить як тип остаточного агрегату, так і техніка його побудови.

У найзагальнішому вигляді *агрегування можна означити як встановлення відношень на заданій множині елементів*. Унаслідок значної свободи вибору в тому, що саме розглядати як елемент, як утворено множину елементів і які відношення встановлено (тобто виявлено чи нав'язано) на цій множині, виникає дуже велика кількість й різноманітна якісно множина задач агрегування. Зазначимо тут лише основні агрегати, типові для системного аналізу: конфігуратор, агрегати-оператори й агрегати-структури.

5.5.1. Конфігуратор

Усяке дійсно складне явище потрібно різнобічно й багатопланово описати, розглянути з різних точок зору. Тільки спільний опис (агрегування) у термінах декількох якісно різних мов дає змогу достатньо повно охарактеризувати явище. Наприклад, автомобільну катастрофу слід розглядати не тільки як фізичне явище, зумовлене механічними причинами (технічним станом автомобіля та дорожнього покриття, силами інерції, тертя, ударів тощо), але і як медичне, соціальне, економічне, юридичне. У реальному житті не буває чисто фізичних, хімічних, економічних, суспільних або навіть системних проблем — ці терміни позначають не саму проблему, а обраний погляд на неї. За образним висловом письменника-фантаста П. Андерсона, проблема, хоч би якою складною вона не була, стане ще

складнішою, якщо її правильно розглядати.

Ця багатоплановість реального життя дуже важлива для системного аналізу. З одного боку, системний аналіз має міждисциплінарний характер. Системний аналітик готовий досліджувати системи з будь-якої галузі знань, залучати експертів будь-яких спеціальностей, якщо це в інтересах справи; з іншого боку, перед ним постає неминуче питання про припустиму мінімізацію опису явища. Якщо в декомпозиції це питання можна компромісно зважити за допомогою поняття істотності, що дає певну свободу вибору, супроводжувану ризиком недостатньої повноти чи надмірної деталізації, то в разі агрегування воно загострюється: ризик неповноти стає майже неприпустимим, оскільки тоді мова може йти взагалі не про те, що ми маємо на увазі; ризик перевизначення пов'язаний із великими зайвими витратами.

Наведені поняття дають змогу означити поняття агрегату, який складається з якісно різних мов опису системи; кількість цих мов мінімальна, але потрібна для досягнення заданої мети. За В. Лефевром назовемо такий агрегат **конфігуратором**.

Головне в конфігураторі не те, що потрібно аналізувати об'єкт окремо кожною мовою конфігуратора, а те, що синтез, проектування, виробництво й експлуатація приладу можливі тільки за наявності всіх його описів.

Приклад 1. Обговорюючи кандидатури на керівну посаду, кожного претендента оцінюють з урахуванням його професійних, ділових, ідейно-політичних, моральних якостей і стану здоров'я.

Приклад 2. Описуючи процеси, що відбуваються в народно-господарських комплексах обласного масштабу, для характеристики будь-якого вихідного продукту виробничої сфери чи сфери обслуговування використовують три типи показників: натуральні (економіко-технологічні), грошові (фінансово-економічні) та соціально-ціннісні (ідеологічні, політичні, етичні й естетичні). Діяльність заводу та театру, ферми та школи, будь-якого підприємства й організації описують трьома мовами, які утворюють конфігуратор стосовно цілей автоматизованої системи управління господарством області.

Приклад 3. Досвід проектування організаційних систем показує, що конфігуратор для синтезу такої системи складається з опису

розподілу влади (структури підпорядкованості), відповідальності (структури функціонування) й інформації (організації зв'язку та пам'яті системи, нагромадження досвіду, навчання, історії). Усі три структури не обов'язково мають збігатися топологічно, хоча вони й поєднують одні й ті самі частини системи.

Конфігуратор — це змістовна модель найвищого можливого рівня. Назвавши мови, якими ми будемо говорити про систему, тим самим можна визначити, синтезувати тип системи, зафіксувати наше розуміння її природи. Як усяка модель, конфігуратор має цільовий характер і зі зміною мети може втратити свої основні властивості. Очевидно, що в простих випадках конфігуратор — адекватна модель; в інших випадках його адекватність підтверджує практика; у повноті третіх конфігураторів ми лише більш-менш упевнені й готові доповнити їх новими мовами.

5.5.2. Агрегати-оператори

Найчастіше агрегування потрібне тоді, коли сукупність даних, з якими доводиться мати справу, занадто велика, погано доступна для огляду, із цими даними важко працювати. На перший план виходить така особливість агрегування, як зменшення розмірності: агрегат поєднує частини в щось ціле, єдине, окреме.

Найпростіший спосіб агрегування полягає в установленні відношення еквівалентності між агреговуваними елементами, тобто утворення класів. Це дає змогу говорити не тільки про клас у цілому, але й про кожен його елемент окремо.

Можна розглядати різні задачі, пов'язані з класифікацією та її використанням. Класифікація — дуже важливе та багатфункціональне, різнобічне явище в людській практиці взагалі й у системному аналізі зокрема. Із практичного погляду одна з найважливіших проблем — визначення, до якого класу належить конкретний елемент. Обговоримо її докладніше.

5.5.3. Класифікація як агрегування

Якщо ознака належності до класу безпосередньо спостережува-

на, то особливих труднощів класифікації немає. Однак і тоді на практиці виникає питання про надійність, правильність класифікації. Наприклад, розкласти пофарбовані шматки картону за кольорами — важке завдання навіть для вчених-психологів, бо незрозуміло, до якого класу віднести жовтогарячий шматок: до червоних чи до жовтих, — якщо між ними немає інших класів? Якщо безпосередньо спостережувану ознаку належності до класу сформульовано природною мовою, то, як відомо, стає неминучою певна невизначеність (розпливчастість).

Складність класифікації різко зростає, якщо ознака класифікації не спостережувана безпосередньо, а сама являє собою агрегат непрямих ознак. Типовий приклад — діагностика захворювання за результатами анамнезу: діагноз хвороби (її назва — ім'я класу) — це агрегат великої сукупності її симптомів і характеристик стану організму. Якщо класифікація має природний характер, то агрегування непрямих ознак можна розглядати як виявлення закономірностей у таблицях експериментальних даних, тобто як пошук стійких, досить часто повторюваних у навчальній вибірці поєднань ознак. При цьому доводиться перебирати всі можливі комбінації ознак, щоб перевірити їх повторюваність у навчальній вибірці. Узагалі, метод перебору варіантів — найбільш очевидний, простий і надійний спосіб пошуку рішення. Незважаючи на трудомісткість, його нерідко з успіхом застосовують. Т. Едісон твердив, що перебір — основний метод його винахідницької діяльності (хоча, швидше за все, це жарт). Однак уже в разі зовсім невеликої кількості ознак повний перебір стає нереальним навіть із використанням ЕОМ. Успіх значною мірою залежить від того, чи вдасться знайти метод скорочення перебору, який дає змогу отримати “хороше” рішення. Розробці таких методів присвячено багато досліджень.

5.5.4. Функція декількох змінних як агрегат

Інший тип агрегату-оператора виникає, якщо агреговувані ознаки зафіксовано в числових шкалах. Тоді можна задати відношення на множині ознак у вигляді числової функції декількох змінних, яка являє собою агрегат.

Свобода вибору в заданні функції, що агрегує змінні, удавана, якщо надати їй якогось реального змісту. У цьому відношенні характерний перехід від багатокритеріальної оптимізаційної задачі до однокритеріальної за допомогою агрегування декількох критеріїв у один суперкритерій. Суперкритеріальна функція — це, власне кажучи, модель системи. Не знаючи “істинної” впорядкувальної функції, можна апроксимувати її гіперплощиною (тобто лінійною комбінацією частинних критеріїв), прагнучи, щоб ця гіперплощина була “досить близька” до невідомої суперповерхні (тоді порівнювані альтернативи близькі до точки торкання суперплощини із суперповерхнею). Якщо ми не в змозі забезпечити це, то можна використовувати кусочно-лінійні й інші нелінійні апроксимації, тобто інші агрегати критеріїв, або взагалі відмовитися від їх агрегування в один критерій. Паретівська оптимізація в якомусь розумінні аналогічна відмові від агрегату-оператора та поверненню до агрегату-конфігуратора.

У тих (на жаль, рідкісних) випадках, коли агрегат-оператор являє собою цілком адекватну модель системи, узагалі немає свободи вибору функції, що агрегує набір змінних. Саме так буває, коли закономірності природи відображають безрозмірні степеневі одночлени фізичних величин (тобто залежних від декількох інших величин) у разі зміни одиниць виміру вихідних величин. Це дає змогу сформулювати такий нетривіальний висновок: *якщо вдалося побудувати безрозмірний степеневий одночлен із розмірних фізичних величин, які утворюють конфігуратор розглянутого явища, то виявлено фізичну закономірність цього явища.*

Рідкісний приклад однозначності функції-агрегату — широко використовуваний вартісний аналіз економічних систем. Якщо всі фактори можна виразити в термінах грошових витрат і доходів, то агрегат виявляється їх алгебричною сумою. Питання полягає лише в тому, коли можна використовувати цей агрегат, не звертаючись до інших систем цінностей, а коли слід повернутися до конфігуратора, який містить політичні, моральні, екологічні, а не тільки фінансові критерії.

Додамо, що числову функцію можна задавати не тільки на числових аргументах, і це дає змогу розглядати ще один вид агрегату-функції.

5.5.5. Статистики як агрегати

Важливий приклад агрегування даних дає статистичний аналіз. Серед різних агрегатів (називаних у цьому разі **статистиками**, тобто функціями вибіркового значень) особливе місце посідають **достатні статистики** — агрегати, які добувають усю корисну інформацію про потрібний параметр із сукупності спостережень. Однак у разі агрегування зазвичай неминучі втрати інформації, і достатні статистики щодо цього — виняток. За таких умов важливі **оптимальні статистики**, що в певному розумінні дають змогу звести неминучі втрати до мінімуму. Наочний приклад статистичного агрегування являє собою факторний аналіз, у якому декілька змінних зводять в один фактор. Саме тому, що під час розгляду реальних даних найважливіше — це побудова моделі-агрегату в разі браку інформації, потрібної для теоретичного синтезу статистики, Дж. Тьюкі запропонував назвати цю галузь аналізом даних, залишаючи за математичною статистикою задачі алгоритмічного синтезу та теоретичного аналізу статистик.

Нарешті, зі створенням агрегату-оператора пов'язаний не тільки вигравш, заради якого його створюють, але й ризик потрапити в “пастки”. Зазначимо основні з них:

- втрата корисної інформації. Агрегування — незворотне перетворення (наприклад, за сумою неможливо відновити доданки), що в загальному випадку призводить до втрат; достатні статистики — лише щасливий виняток (якщо сума — достатня статистика, то інформація про окремі доданки не потрібна);

- агрегування — це вибір певної моделі системи, з яким пов'язані непрості проблеми адекватності;

- деяким агрегатам-операторам притаманна внутрішня суперечливість, поєднана з негативними (стосовно цілей агрегування) наслідками. Найяскравіший приклад цього — теорема про неможливість, але чи мають цю властивість (хоча й виражену в різному ступені) усі агрегати?

5.5.6. Агрегати-структури

Важлива (а на етапі синтезу — найважливіша) форма агрегування — утворення структур. До вже сказаного про моделі структур можна додати ось що.

Як і будь-який вид агрегату, структура — це модель системи, тому її можна задати потрібною сукупністю: об'єктом, метою та заходами моделювання. Це й пояснює різноманіття типів структур (мережі, матриці, дерева тощо), які виникають у процесі їх виявлення й опису (пізнавальні моделі).

Під час синтезу ми створюємо, визначаємо, нав'язуємо структуру майбутній (проектованій) системі (прагматичні моделі). Якщо це не абстрактна, а реальна система, то в ній цілком реально (тобто незалежно від нашого бажання) виникнуть, установляться й почнуть “працювати” не тільки спроектовані нами зв'язки, але й безліч інших, не передбачених, які випливають із самої природи зведених в одну систему елементів. Тому, проектуючи систему, важливо задати її структуру в усіх істотних відношеннях, тому що в інших відношеннях структури складуться самі, стихійно (звичайно, не зовсім незалежно від установлених і підтримуваних проектних структур). Сукупність усіх істотних відношень визначається конфігуратором системи, і звідси випливає, що *проект будь-якої системи має містити розробку стількох структур, скільки мов включено в її конфігуратор*. Наприклад, у проекті організаційної системи мають бути структури розподілу влади, відповідальності й інформації. Хоча ці структури можуть суттєво різнитися топологічно (наприклад, структура підпорядкованості ієрархічна, а функціонування організоване за матричною структурою), вони лише з різних боків описують одну й ту саму систему, тому не можуть бути не пов'язані між собою.

У сучасних системних науках усе більшу увагу приділяють одному зі специфічних видів структур — так званим **семантичним мережам**. Початок їх дослідженню й застосуванню поклав у 60-х роках ХХ ст. Д. Поспелов у розвинутому ним ситуаційному управлінні. Тепер такі мережі з різних позицій вивчають у багатьох наукових колективах, оскільки логіко-лінгвістичні моделі (інша назва семантичних мереж) виявилися в центрі всіх подій, що відбуваються

в дослідженнях штучного інтелекту та його застосувань. Це пов'язано з тим, що зазначені моделі відображають структуру людських знань, які виражаються природною мовою, причому таке відображення можна реалізувати засобами ЕОМ.

Хоча можна навести, здавалося б, усі мислимі структури як окремі випадки повного графа, деякі явища природи наводять на думку, що в цьому питанні не слід поспішати з остаточними висновками. Окремі особливості живих організмів, економічних і соціальних систем змушують припустити, що навіть найскладніші моделі структурної організації в чомусь занадто прості.

Очевидний приклад нерозв'язаної задачі організації системи — робота людського мозку, хоча точно відомо, що він складається з 10^{10} нейронів, кожен з яких має 10^2 – 10^3 нервових закінчень і може перебувати лише в одному з двох станів.

Інші цікаві приклади реальних систем, структуру яких не охоплює сучасна теорія керування, наводив у одному зі своїх виступів академік А. Дородніцин.

Так, тривалий час уважали, що тропічні ящірки-гекони здатні бігати по стінах і стелі завдяки мікроскопічним присоскам на лапках. Коли ж виявилось, що гекон не може бігати по полірованому склу, з'ясувалося, що ніяких присосків немає, а є багато тисяч дрібних волосків, що з усіх боків обхоплюють, а в потрібний момент відпускають найменші шорсткості поверхні стіни чи стелі. У процесі погоні за мухою кожному волоску-щупу потрібно віддати правильну команду в потрібний момент! Ясно, що централізована система з цим не справиться, але як тоді синхронізується нецентралізоване керування?

Не менш разючий і інший приклад. Багато хто з головоногих здатен змінювати своє забарвлення, ототожнюючи його з навколишнім середовищем. Так, якщо тільки що пійманого восьминога покласти на газету, то на його тілі виступлять смужки, котрі імітують рядки, а у великих заголовках можна навіть розрізнити деякі букви. Виявилось, що забарвлення восьминога залежить від того, наскільки розтягнені мікроскопічні пружні кульки, розподілені по всьому його тілу. Колір кульки визначається довжиною хвилі, до розмірів якої він розтягнений. Але кожна кулька має “знати”, до якої довжини

їй розтягтися, щоб створити свій фрагмент у загальній мозаїці! Як відбувається така координація?

Можливо, існують ще не відомі нам принципи самоорганізації? Можливо, є якісна, а не кількісна різниця між об'єднаннями великої кількості складових з малою та великою кількістю зв'язків для кожної з них? Подібні питання поки що залишаються без відповіді.

Запитання та завдання до розділу 5

1. У чому полягає процедура декомпозиції?
2. Які моделі потрібно мати для виконання процесу декомпозиції?
3. Що таке фрейм? Яку роль фрейми відіграють у процесі виконання декомпозиції?
4. У чому полягає проблема повноти моделі? Як досягти повноти декомпозиції?
5. Як досягти компромісу між повнотою та простотою декомпозиції?
6. Наведіть приклад алгоритму декомпозиції.
7. Що таке релевантні компоненти?
8. Які типи складності виникають під час реалізації процедури декомпозиції?
9. Коли застосовують процедуру агрегування? У чому вона полягає?
10. Опишіть властивість емерджентності. Яким об'єктам вона притаманна?
11. Які види агрегування ви знаєте?
12. Що таке конфігуратор системи? Наведіть приклади конфігураторів соціальних систем.
13. Наведіть приклади типів агрегатів.
14. Що спільного між декомпозицією й агрегуванням?

Розділ 6

ПРО НЕФОРМАЛІЗОВАНІ ЕТАПИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

6.1. Що таке системний аналіз

Системний аналіз виник у відповідь на вимоги практики, яка поставила нас перед нагальною потребою вивчати та проектувати складні системи, керувати ними в умовах неповноти інформації, обмеженості ресурсів, дефіциту часу. Дотепер тривають суперечки, чи можна вважати системний аналіз наукою, мистецтвом чи технологічним ремеслом. Особливо гостро дискутуються застосування системного аналізу до проблем, пов'язаних із соціотехнічними й соціальними системами, у яких вирішальну роль відіграють люди. Істотними в розв'язанні таких проблем виявляються не тільки питання побудови та використання моделей, не тільки евристичні пошуки розв'язків слабо структурованих, не цілком формалізованих задач, але й чисто психологічні аспекти людських взаємин, що ще більше відділяє системний аналіз від “чистих” наук типу фізики та математики.

Різномірні знання та системний аналіз. Суперечки про ступінь науковості системного аналізу зумовлені низкою причин. По-перше, досить часто недооцінюють роботу з формулювання задач.

Багато хто вважає, що справжня робота не починається доти, поки не побудовано формальні моделі, а вираз: “Добре поставити задачу — значить наполовину розв’язати її” — розцінюють як жарт. У системному аналізі акцентують увагу на труднощах формулювання задач і способах їх подолання.

По-друге, для подолання складності, природа якої пов’язана з неповною формалізованістю, потрібно систематично застосовувати неформальні знання та методи. Це образно описав І. Мітрофф. Свідомо спрощуючи класифікацію знань, він поділив їх на два основні типи — формалізовані (академічні) і неформалізовані (життєві), а також розглянув два рівні розвиненості (“високі” та “низькі”) для кожного з цих типів знань. У результаті можна отримати табл. 4 [183].

Таблиця 4

Співвідношення між двома типами знань

Життєві	Академічні	
	Високі	Низькі
Високі	I	II
Низькі	IV	III

Аналізуючи особливості роботи системних аналітиків, І. Мітрофф пише: “Інакше кажучи, ми не маємо ні глибоких “життєвих” знань зсередини про організацію, яку ми вивчаємо, ні дуже хороших формальних теорій, котрі в разі їх додавання до організації пояснили б що-небудь, крім очевидного. Далі, традиційно наукові кола наголошують на комірці IV. Вони цінують формальні теорії вище, ніж знання практика, навіть якщо й погоджуються колись, що практики взагалі здатні мати щось, що називається “знанням”. Передбачено, що практики, звичайно, мають віддавати перевагу комірці II перед іншими комірками.

Залишається ще одна комірка — I. Думаю, що саме тут мають бути зосереджені наші зусилля. Саме тут ми повинні працювати. Я не вірю, що ми можемо створити щось близьке до прикладної соціальної науки, якщо воно не буде ґрунтуватися на обох типах

знань і на поважному ставленні до них обох” [183].

Усе сказане підтверджує, що системний аналіз поєднує теорію та практику, здоровий глузд і абстрактну формалізацію.

6.2. Формулювання проблеми

Постановка формальної задачі, яку треба розв’язати, для традиційних наук — початковий, відправний етап роботи. У дослідженні ж або проектуванні складної системи це проміжний результат, якому передують тривала кропітка та складна робота зі структуривання вихідної проблеми.

Проілюструємо основні особливості такої роботи, яка являє собою перші етапи системного аналізу, на прикладі “соціотехнічних” систем (назву взято в лапки, оскільки системологічна термінологія в українській мові ще не зовсім усталена). Особливість соціотехнічної системи полягає в тому, що люди в ній відіграють важливу роль. Є й інші назви таких систем (не зовсім синонімічні): організаційні (переважно такі, що складаються з людей), автоматизовані (із людей і машин), людино-машинні (з однієї людини й однієї машини).

Типові приклади соціотехнічних систем — організації типу міської медичної служби, заводу, системи транспорту чи зв’язку, екологічні системи. Участь у них людей із різними інтересами робить аналіз таких систем особливо складним. Зрозуміло, що системний аналіз застосовний і до менш складних систем; при цьому багато етапів аналізу простіші, їх можна виконати швидше, а іноді й взагалі пропустити як уже виконані раніше; крім того, зменшується кількість ітерацій, повернень від наступних етапів до попереднього, що типово для аналізу складних систем.

Чим простіша аналізована система, тим ближчий реалізований алгоритм її аналізу до лінійного; чим система складніша, тим більше циклів реалізується під час її аналізу, що, до речі, може бути самостійною ознакою складності.

6.2.1. Перетворення проблеми в проблематику

Перші кроки в системному аналізі пов'язані з *формулюванням проблеми*. Хоча потреба в ньому виникає тоді, коли проблема вже не тільки існує, але й потребує розв'язання, коли ініціатор системного аналізу (замовник, клієнт) уже сформулював свою проблему, системний аналітик знає, що первісне формулювання — лише дуже приблизний натяк на те, яким саме має бути дійсне робоче формулювання проблеми. Це стосується не тільки випадків, коли замовник лише зазначає сферу інтересів (“Як поліпшити роботу медичних установ?”) або “Як підвищити активність і самостійність студентів?”), але й коли він досить конкретний (“Який із запропонованих проєктів прийняти до виконання?” чи “Якою має бути модель наступного покоління виробу?”) або навіть зовсім точний (“Де в районі розмістити нову лікарню?”, “Які оптимальні параметри виробу?”).

Є причини вважати будь-яке вихідне формулювання проблеми лише нульовим наближенням. Основна з них полягає в тому, що **проблемомістка система** (у діяльності якої проблема проявилась як негативне, небажане явище) не ізольована й не монолітна: вона пов'язана з іншими системами та входить як частина в якусь надсистему; сама вона, у свою чергу, складається з частин, підсистем, у різному ступені пов'язаних із проблемою. Якщо це дійсно реальна проблема, і ми маємо намір хоча б послабити її гостроту, то потрібно враховувати, як це позначиться на тих, кого неминуче торкнуться заплановані зміни.

Отже, до будь-якої реальної проблеми потрібно апріорі ставитися не як до окремо взятої, а як до “клубка” взаємозалежних проблем. Застосовуючи для позначення цієї сукупності термін **“проблематика”**, можна сказати, що етап формулювання проблеми полягає у визначенні проблематики (техніку виконання цієї операції буде розглянуто пізніше).

Інша важлива причина того, щоб розглядати первісне формулювання проблеми не як безумовну відправну точку подальшого аналізу, а як початковий об'єкт, котрий потрібно вивчати й уточнювати, полягає в тому, що пропонуване замовником формулювання — його модель реальної проблемної ситуації. Звідси випливає, що слід

ураховувати не тільки точку зору замовника, позиції інших зацікавлених сторін (що, як уже було показано, зумовлює потребу в розширенні проблеми до проблематики), але й те, що його модель, як і будь-яка інша, неминуче має цільовий характер, вона приблизна, спрощена. Тому треба перевіряти запропоноване формулювання на адекватність, що зазвичай спричинює розвиток, доповнення, уточнення первісного варіанта опису проблеми. Розвиток опису полягає також і в тому, що первісне формулювання можна викласти в термінах не всіх мов, включених у конфігуратор.

Отже, системне дослідження будь-якої проблеми починається з її розширення до проблематики, тобто відшукування системи проблем, істотно пов'язаних із досліджуваною, без урахування яких її не можна розв'язати. Це розширення відбувається як “ушир” унаслідок виявлення зв'язків проблемомісткої системи з над- і підсистемами, так і “всередину” в результаті розгляду проблеми з погляду кожної з мов конфігуратора та (якщо потрібно) деталізації вихідної проблеми.

6.2.2. Методи побудови проблематики

Наведемо деякі рекомендації щодо побудови проблематики. Очевидно, що для розв'язання проблеми потрібна змістовна модель над- і підсистем відносно проблемомісткої системи. Формальну схему організаційної системи, що дає наукову змістовну модель, зображено на рис. 21.

В англійській літературі з аналізу соціотехнічних систем часто використовують подібну модель під назвою “stakeholders”, що означає “перелік зацікавлених осіб”. До нього рекомендують включати таких осіб:

- 1) клієнта — того, хто ставить проблему, замовляє й оплачує системний аналіз;
- 2) осіб, що приймають рішення, — тих, від повноважень яких безпосередньо залежить розв'язання проблеми;
- 3) учасників: як активних, чії дії потрібні під час розв'язання проблеми, так і пасивних — тих, на кому позначається (позитивно чи негативно) наслідки розв'язання проблеми;

4) самого системного аналітика та його співробітників, насамперед для того, щоб передбачити можливість мінімізації його впливу на інших зацікавлених осіб, — своєрідна міра безпеки, у доцільності якої ми неодноразово переконаємося пізніше.

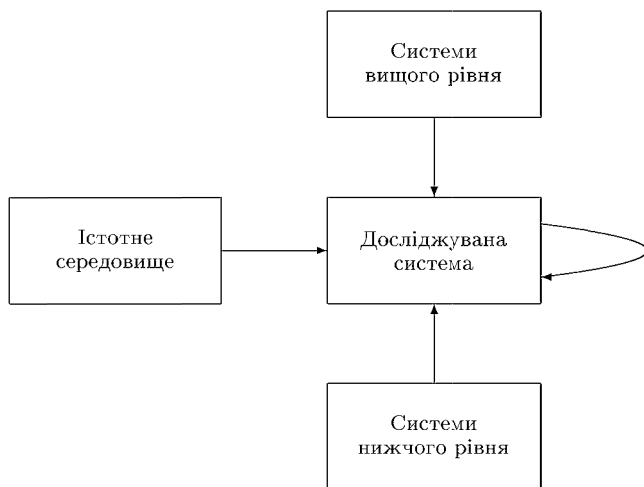


Рис. 21. Схема входів організаційної системи

Слово “зацікавлений” слід розуміти широко, оскільки в перелік потрібно включити й тих, хто чинить опір можливим змінам.

Кожна із зацікавлених сторін має власне бачення проблеми, ставлення до неї. Формулювання проблематики полягає в описі того, які зміни й чому хоче внести кожна із зацікавлених осіб. Згідно з діалектичним методом потрібно розглядати проблему всебічно, зокрема в часовому, історичному плані. По суті справи, проблематика — це відповідь на запитання: “Які обставини й минулий досвід змушують саме цих зацікавлених осіб, саме в цьому культурному середовищі, що містить саме ці цінності, сприймати такий стан справ як проблему?”. Щоб відповідь на це запитання була повною, слід дати її всіма мовами конфігуратора.

Зрозуміло, що в разі розгляду проблемомістких систем іншої природи (суто технічних, чисто біологічних, економічних та ін.) змістовні моделі над- і підсистем виявляться іншими, однак методика визначення проблематики може залишатися тією самою.

Хоч якою б не була природа розглянутої системи, її проблематика містить цілий спектр проблем: від тих, які можна формалізувати у вигляді постановки математичних оптимізаційних задач (добре структурованих, формалізованих, формальних; англійські терміни — *hard problems*, *well-defined problems*) до “пухких” проблем, слабо структурованих, неформалізованих, виражених природною мовою (англійські терміни — *soft problems*, *ill-defined problems*). Природно, що ці проблеми слід розглядати по-різному, але в практиці системного аналізу є тенденція зводити всі проблеми до одного типу. Та сама практика показує, що досліджувати “пухку” проблему як “тверду” оптимізаційну набагато небезпечніше, ніж навпаки: якщо в другому випадку ми лише частково відмовляємося від якоїсь корисної інформації, то в першому додаємо помилкову інформацію, уводячи себе й інших в оману. Розрізнити “тверді” та “пухкі” проблеми в ході аналізу — одна з умов якісного аналізу (але не його гарантія!).

Будуючи проблематику, системний аналітик дає розгорнену картину того, хто з зацікавлених осіб у чому зацікавлений, які зміни й чому вони хочуть унести. При цьому власна його позиція має бути нейтральною, він не повинен впливати на думки обстежуваних осіб. Наприклад, у ході з’ясування проблематики системний аналітик має уникати реплік типу: “Я згоден (не згоден) із вами”, краще сказати: “Я слухаю вас”.

6.3. Виявлення цілей

Як добре формалізовані, так і слабо структуровані проблеми потрібно зводити до такого вигляду, щоб вони стали задачами вибору придатних засобів для досягнення заданих цілей. Тому насамперед слід визначити цілі. На цьому етапі системного аналізу виявляють, що треба зробити для зняття проблеми (на відміну від наступних

етапів, коли визначають, як це зробити).

Основні труднощі виявлення мети пов'язані з тим, що цілі — ніби антипод проблеми. Формулюючи проблему, ми явно говоримо, що нам не подобається. Зробити це порівняно просто, бо те, чого ми не хочемо, існує. Говорячи ж про цілі, ми намагаємося сформулювати, чого ми бажаємо. Ми ніби зазначаємо напрямок, у якому слід “іти” від ситуації, яка нас не влаштовує. Труднощі полягають у тому, що можливих напрямків багато, а вибрати потрібно тільки один, дійсно правильний.

Розглянемо основні труднощі виявлення цілей і методи їх подолання.

6.3.1. Небезпека підміни цілей засобами

Як не дивно, у практиці системного аналізу спочатку сформульовані цілі в міру виконання часто змінюють або зовсім скасовують. Це пов'язано з тим, що суб'єкт, цілі якого потрібно виявити, зазвичай сам не може чітко усвідомити їх, навіть якщо й дає їм чіткі формулювання. Дійсні цілі переважно ширші, ніж оголошені. Наприклад, в одному дослідженні проблеми “де краще розмістити лікарню” з'ясувалося, що дійсна мета — поліпшити медичне обслуговування населення, і серед запропонованих альтернатив знайшлися ефективніші способи використання ресурсів, ніж будівництво нової лікарні. Це приклад того, як засоби можна вважати цілями. Ще один приклад — розгляд пропозиції про злиття в одній з областей дрібних деревообробних підприємств в одне велике об'єднання, з очевидними вигодами технологічного й економічного характеру. Місцева влада, яка проголошувала зацікавленість у підвищенні ефективності виробництва, заблокувала цей варіант. Виявилось, що після утворення об'єднання деревообробні підприємства перейдуть із системи місцевої промисловості в підпорядкування міністерства, що різко зменшить як відрахування в місцевий бюджет, так і частку вироблених матеріалів і виробів, розподілюваних в області.

Отже, у дослідженні цілей зацікавлених у проблемі осіб слід передбачати можливість їх уточнення, розширення чи навіть заміни.

У цьому полягає одна з основних причин ітеративності системного аналізу.

6.3.2. Вплив цінностей на цілі

На вибір навіть конкретних, частинних цілей суб'єкта вирішальний вплив справляє його загальна ідеологія, система цінностей, якої він дотримується. Одним із напрямів дослідження в ході виявлення мети може бути (коли це потрібно) вивчення системи цінностей, насамперед осіб, які приймають рішення; однак слід брати до уваги також системи цінностей інших зацікавлених сторін.

У науковій літературі й публіцистиці нерідко звертають увагу на певну протилежність технократичного та гуманістичного мислення як різних підходів до формування цілей. Основну їх розбіжність образно можна висловити так: “Людина — цар природи; людина — частина природи”. Різні автори по-різному протиставляють їх (табл. 5) [178].

Наведені переліки не претендують на повноту, вони лише ілюструють різницю між двома стилями мислення. Хоча таке порівняння зазвичай проводять для того, щоб показати (цілком правдиво) небезпечні для людини наслідки чисто технократичного підходу до вибору цілей, повна відмова від усіх технократичних цінностей не виправдана. Наприклад, науково-технічний прогрес — це не альтернатива цілям соціального розвитку, а його засіб; освіту можна розглядати як антипод культури тільки у відриві від неї.

Питання про систему цінностей, власне кажучи, пов'язане з вибором конфігуратора — мов, якими проводять системний аналіз. Про це говорив С. Бір: “Значення кібернетики нині визначається не приписуваною їй здатністю створити надмозок, а потребою в найкоротший термін розстатися з архаїчною системою поглядів на сутність керування взагалі... Чи існують люди, які готові заперечувати роль етики й естетики тільки тому, що створено механічну черепаху? Як це не абсурдно, дійсно існують. Нехай же той, хто хоч якоюсь мірою розуміє справжню могутність кібернетики та її можливості, не слідує їх прикладу” [2].

Таблиця 5

Протилежність технократичного та гуманістичного мислення

Система цінностей	
Технократична	Гуманістична
Природа — джерело необмежених ресурсів	Природні ресурси обмежені
Перевага над природою	Гармонія з природою
Природа ворожа чи нейтральна	Природа дружня
Кероване навколишнє середовище	Навколишнє середовище в хиткій рівновазі з людиною
Інформаційно-технологічний розвиток суспільства	Соціокультурний розвиток
Ринкові відносини	Суспільні інтереси
Ризик і вигравш	Гарантії безпеки
Індивідуальне самозабезпечення	Колективістська організація
Розумність засобів	Розумність цілей
Інформація, запам'ятовування	Знання, розуміння
Освіта	Культура

6.3.3. Множинність цілей

Ми розглядаємо питання виявлення цілей тільки найвищого рівня, оскільки цілі нижніх рівнів можна отримати з цілей верхніх алгоритмічно, методом декомпозиції. Однак і на найвищому рівні зазвичай буває кілька цілей (навіть якщо текстуально їх об'єднано одним формулюванням у глобальну мету), і важливо не пропустити яку-небудь істотну з них. Один зі способів уже було використано вище: ми скористалися моделлю над- і підсистем відносно проблемомісткої системи. Це дає змогу врахувати цілі всіх зацікавлених сторін. Але стосовно кожної зі сторін також виникає проблема повноти задання її цілей. Разом із неясністю первісної мети це зумовлює те, що потрібні якісь рекомендації щодо пошуку істотних цілей. Корисними можуть бути такі способи:

- розглядати цілі, протилежні заявленим (як у наведеному вище прикладі — “не будувати лікарню”), і “двоїсті” (наприклад, “мінімізувати страждання” — не те саме, що “максимізувати задоволення”);
- виявляти не тільки “бажані”, але й “небажані” за наслідками цілі (щоб якомога раніше передбачати виникнення нових проблем — типу забруднення навколишнього середовища);
- допускати будь-які цілі (критикувати їх пізніше);
- єдиним обмеженням може бути те, що цілі потрібно висловлювати в номінальній шкалі, тобто вони мають бути назвами. Застосування сильніших шкал — ознака цілей нижчого рівня; це, власне кажучи, перехід від цілей до критеріїв, тобто вже наступний етап аналізу.

6.3.4. Небезпека змішування цілей

Розбіжність між цілями не завжди очевидна, тому є небезпека помилково прийняти одні з них за інші.

Наприклад, П. Ріветт зазначає, що така ситуація виникає зазвичай тоді, коли спеціалісти-професіонали, які беруть участь у розв’язанні проблем, нав’язують своє бачення світу й тим самим підмінюють основні цілі власними. “Операція пройшла успішно, але пацієнт помер”, — це не дурний жарт, а дійсно вживаний серед хірургів вислів. П. Ріветт наводить також приклад зовні дуже елегантного будинку, побудованого в містечку університету графства Сассекс. Незважаючи на те, що цей будинок у 1965 р. одержав золоту медаль Королівської спілки архітекторів, його внутрішнє планування непридатне ні для навчальних, ні для адміністративних цілей. Багато відзначених конкурсними призами рекламних плакатів ніяк не вплинули на збут рекламованої продукції. Обстеження Національної служби здоров’я в Англії показало, що менше одного відсотка часу підготовки лікарів цієї служби присвячено профілактичній медицині, хоча організацію створено саме з цією метою [184].

Змішування цілей може й не бути настільки явним. А. Вольштеттер ілюструє це на прикладі роботи дорожньої поліції: “Батьки міста хотіли б зменшити кількість порушень правил дорожнього руху. Вони хотіли б також карати штрафом або в’язницею якнайбільше

порушників. Існує два добре відомі альтернативні способи досягнення цих цілей — поліцейська засідка та відкрите патрулювання. Перший спосіб збільшує ймовірність затримання порушника. Другий — відбиває охоту до порушень. Якщо наша мета — максимізувати кількість покараних порушників або збільшити міський бюджет за рахунок штрафів, то, очевидно, для цього краще підійде засідка, хоч як не неприємно застосовувати обманну тактику. Якщо ж, з іншого боку, наша мета — зменшити кількість дорожніх подій або, скажімо, кількість спроб порушити правила (навіть якщо самі такі спроби стануть успішнішими, бо порушник буде діяти, точно знаючи, чи присутній поліцейський), то цілком може виявитися, що частіша й відкритіша присутність поліцейських, здатних негайно покарати порушника, спонукатиме водіїв до обережності й тим самим буде досягнуто мету щонайкраще” [56].

Приклади змішування цілей можна продовжувати. Саме це стало причиною екологічних проблем Байкалу, Кара-Богаз-Голу й Онезького озера, розробки невдалого проекту робіт із перекидання вод північних рік на південь тощо.

Щоб наголосити важливість проблеми змішування цілей, П. Ріветт посилається на авторитетну думку: “На запитання про те, що, на його думку, стане головною проблемою наприкінці ХХ століття, Ейнштейн відповів: досконалість засобів і змішування цілей. Дуже схоже, що так воно і вийшло” [184].

6.3.5. Змінення цілей згодом

Діалектичний принцип історизму стосується й цілей. Про можливе (і таке, що зазвичай відбувається) змінення цілей у ході аналізу вже говорилося. Однак змінення цілей із часом може відбуватися не тільки за формою, унаслідок усе кращого розуміння дійсних цілей, але й за змістом — унаслідок зміни об’єктивних умов або суб’єктивних настанов, які впливають на вибір цілей. Терміни старіння цілей різні й залежать від багатьох причин. Цілі вищих рівнів довговічніші. У соціальних системах їх часто формулюють як інтереси майбутніх поколінь. Терміни цілей нижніх рівнів пов’язані з теперішніми діями

та діями в найближчому майбутньому. У системному аналізі потрібно враховувати також динамічність цілей.

6.4. Формування критеріїв

Слово “критерій” будемо вживати не тільки в значенні “критеріальна функція”, а й у ширшому — як будь-який спосіб порівняння альтернатив. Це означає, що критерієм якості альтернативи може бути будь-яка її ознака, значення якої можна зафіксувати в порядковій або сильнішій шкалі. Після того, як таку характеристику знайдено (критерій сформовано), з’являється можливість ставити задачі вибору й оптимізації. Складності та “пастки”, пов’язані з цим вибором, було докладно розглянуто вище. Тепер же ми обговоримо, що відбувається в ході самого процесу формування критеріїв, ще до постановки задачі вибору.

6.4.1. Критерії як моделі цілей

Зміст процесу переходу від цілей до критеріїв і багато особливостей цього переходу стають зрозумілими, якщо розглядати критерії як кількісні моделі якісних цілей. Справді, сформовані критерії надалі в певному розумінні заміняють цілі. Критерії мають бути якомога подібнішими до цілей, щоб оптимізація за критеріями відповідала максимальному наближенню до мети. З іншого боку, критерії не можуть цілком збігатися з цілями вже хоча б тому, що їх фіксують у різних шкалах: цілі — у номінальних, критерії — у сильніших, які можна впорядкувати. Критерій — це подоба мети, її апроксимація, модель. Конкретніше, критерій — відображення цінностей (утілених із метою) на параметри альтернатив (які можна впорядкувати). Відшукування значення критерію для даної альтернативи — це, власне кажучи, непряме вимірювання ступеня її придатності як засобу досягнення мети.

Почнемо розгляд із того, що саме відображають критерії, тобто з системи цінностей, виражених цілями. Існують не тільки альтернативні системи цінностей (як технократична та гуманістична), але

й сумісні: філософські, психологічні, пізнавальні, моральні, економічні, політичні, етичні, естетичні, яких у кожній конкретній ситуації людина дотримується водночас, у повному чи будь-якому частковому виборі, у вигляді конфігуратора. Ці системи цінностей незвідні одна до одної, непорівнянні, непорядковані, тому вже звідси впливає багатокритеріальність реальних задач, пов'язаних зі складними системами.

Практична побудова критеріїв зумовила потребу в узагальненні такого досвіду, тобто створенні теорії цінностей, основне завдання якої — алгоритмізація переходу від цінності до критерію. Важко припустити, що можна побудувати загальну теорію цінностей, але такі частинні теорії існують і розвиваються. Найбільш відомі теорія економічної цінності (вартості), теорія корисності чи психологічна теорія цінності, казуїстична теорія цінності (яка оцінює цінності за минулими прецедентами). Однак навіть у межах частинних теорій є значні труднощі, неясності та складності. У цілому нині побудова критеріїв — це більше мистецтво, ніж наука. Правда, подібні висловлювання ніби означають, начебто в науці не може чи навіть не має бути мистецтва. Насправді ж неформалізовані, творчі, евристичні етапи часто найважливіші в процесі наукового дослідження.

6.4.2. Причини багатокритеріальності реальних задач

Багатокритеріальність реальних задач пов'язана не тільки з множинністю цілей, але й із тим, що одну мету рідко вдається виразити одним критерієм, хоча цього зазвичай прагнуть. Звичайно, можливі випадки, коли єдиний критерій відповідає вимогам практики. Наприклад, за стандартами ЮНЕСКО рівень медичного обслуговування оцінюють за статистикою дитячої смертності. Інший цікавий приклад навів Дж. Моррісей: “Найважча проблема полягає в тому, щоб перебороти опір частини керівників наміру “кількісно оцінити якість”. Вони зазвичай заявляють: “Немає точних і надійних методів для кількісної оцінки творчої праці”. Це заперечення слухне, однак дозвольте послатися на особистий приклад.

У 1963 р. я працював викладачем на курсах з управління ви-

робництвом фірми “Норт Амерікен”. Тоді показником для оцінки ефективності навчального курсу була кількість студенто-годин, що припадають на кожного викладача з кожної дисципліни. Уважаючи себе хорошим фахівцем, я прагнув підвищувати якість навчальної роботи, а не збільшувати її обсяг, і разом з іншими працівниками навчального відділення протестував проти методу оцінки нашої праці за її обсягом. “Ви хочете від нас одержати думку про кількість чи про якість навчальної роботи? Ми не можемо водночас відповідати встановленим вимогам до якості занять і давати великі цифри!” Але коли наші скарги та протести стихли й нам довелося змиритись із заданим нормативом, відбулося щось цікаве. Ми виявили, що існує чітка залежність між кількістю студенто-годин, прочитаних із даного курсу, і якістю викладання. Виявилось, що у викладачів, якими були задоволені й слухачі, і їхні начальники, завжди була більша кількість слухачів, які відвідували їхні заняття. Більше того, вимоги про виконання норми студенто-годин підвищували почуття відповідальності викладача за збільшення кількості охочих займатися в нього та за скорочення кількості пропусків занять. Ми зрозуміли, що викладач дійсно незадовільно виконує доручену йому роботу, якщо не залучає потрібної кількості слухачів із контингенту, на який розраховано його курс. Ми зрозуміли також, що найкраща навчальна програма марна, якщо немає охочих займатися нею чи якщо нею займаються не ті, на кого її розраховано...

Така система, звичайно, не бездоганна. Але дотепер я ще не зустрічав системи управління, яку керівник не міг би “розгромити”, якби захотів. Однак, якщо вас надмірно турбує те, що пропоновану вами систему жорстко розкритикують, це значить, що ви ще не готові до впровадження системи цільового управління” [95].

Усе ж такі випадки, коли єдиний критерій вдало відображає мету, — скоріше виняток. Це й зрозуміло: критерій лише приблизно (як і будь-яка модель) відображає мету, й адекватність одного критерію може виявитися недостатньою. Наприклад, критерій швидкості прибуття пожежників не адекватний меті боротьби з пожежами: він не пов’язаний зі зменшенням кількості загорянь. Обсяг витрат на одного учня не відбиває якості навчання в школі; кількість студентів на одного викладача не однозначно пов’язана з якістю підготовки

фахівців у навчальному закладі тощо.

Розв'язання проблеми може полягати не тільки в пошуку більш адекватного критерію (можливо, його й немає), але й у використанні декількох критеріїв, які по-різному описують одну мету та доповнюють один одного. Е. Квейд наводить цікавий досвід формування критеріїв для досить чіткої мети: поліпшити збирання сміття у великому місті [56]. У результаті аналізу було відкинута як неадекватні такі, на перший погляд, прийнятні критерії: витрати на збирання сміття в розрахунку на одну робочу людино-годину, загальна маса сміття, яке вивозять — ці критерії нічого не говорять про якість роботи. Більш удалими було визнано такі критерії, як частка житлових кварталів, де немає захворювань, кількість пожеж через загоряння сміття, кількість укусів людей пацюками, кількість обґрунтованих скарг жителів на скупчення сміття. Утім, мабуть, і ці критерії відбивають тільки окремі аспекти якості збирання сміття в місті.

6.4.3. Критерії й обмеження

Зазначивши, що багатокритеріальність — це спосіб підвищення адекватності опису мети, звернімо тепер увагу на те, що *річ не тільки й не стільки в кількості критеріїв, скільки в тому, щоб вони досить повно “покривали” мету*. Це означає, що критерії мають описувати по можливості всі важливі аспекти мети, але при цьому бажано мінімізувати кількість потрібних критеріїв.

Останню вимогу буде задоволено, якщо критерії незалежні, не пов'язані один з одним (наприклад, бажано не використовувати в різних складових вимірюванні величини чи величини, виведені одна з одної, тощо).

Що ж стосується виконання вимоги повноти, всебічності, то ми маємо вже випробуваний спосіб: використовувати досить повні моделі розглянутої ситуації. Які саме з цих моделей чи які їх комбінації виявляться корисними, має визначити системний аналітик; у цьому й полягає його робота. До вже розглянутих раніше додамо ще одну важливу модель, широко використовувану в системному аналізі (а не тільки для даної мети).

Це модель проблемної ситуації як сукупності таких трьох систем, що взаємодіють:

- проблемомісткої — системи, у якій дану ситуацію сприйнято як проблему;
- проблеморозв'язувальної — системи, що може так вплинути на хід подій, що проблема зникне чи ослабне;
- навколишнього середовища, у якому існують і в якому взаємодіють обидві попередні системи.

Цю модель фактично вже було використано в алгоритмі декомпозиції. Там об'єкт аналізу виражав інтереси проблемомісткої системи, а як цільову було взято саме проблеморозв'язувальну систему. Іноді (хоча й рідко) обидві ці системи можуть бути поєднані. Навколишнє середовище було відображено лише у вигляді входів і виходів цільової системи.

Стосовно формування критеріїв ця модель дає змогу не тільки збільшити повноту набору критеріїв, але й структурувати їх сукупність, увести такі розбіжності між ними, які згодом полегшать постановку оптимізаційних задач. Суть справи (спрощено) полягає в тому, що характер цілей трьох зазначених учасників проблемної ситуації різний. Для проблемомісткої системи це цілі досягнення (головне — розв'язати проблему); цілі проблеморозв'язувальної системи пов'язані з раціональною витратою ресурсів на розв'язання проблеми (головне — ощадливість), а втручання середовища в цей процес зазвичай пасивне, але обов'язкове (головне — не починати нічого, що суперечило б законам природи). Так виникають критерії ефективності, які потрібно оптимізувати (нерідко суперечливі), а також критерії збереження, обмеження, згідно з якими слід дотримуватися їх сталості. Під час постановки оптимізаційних задач усі ці критерії пов'язують воедино. Змістовний аспект цього процесу полягає в тому, що ресурси проблеморозв'язувальної системи узгоджують із потребами проблемомісткої обмеженнями, накладеними середовищем. При цьому може виникнути потреба в додаткових ітераціях, чого не слід уникати в дослідженнях складних систем.

Цільові критерії й обмеження в чомусь подібні, проте між ними є й розбіжності. На наступних етапах (наприклад, під час розв'язання деяких типів оптимізаційних задач) вони можуть бути

рівноправними. Однак на етапах формування критеріїв і генерування альтернатив (останній буде розглянуто далі) вони істотно різняться. Цільовий критерій ніби відкриває можливості для висування все нових і нових альтернатив у пошуках найкращої з них, а обмеження зменшує їх кількість, забороняючи деякі з альтернатив. Одними цільовими критеріями можна жертвувати заради інших, а обмеження виключати не можна, їх потрібно жорстко дотримуватися. У цьому розумінні обмеження спрощують, а не ускладнюють роботу системного аналітика.

У практиці системного аналізу трапляються випадки, коли накладені обмеження настільки сильні, що внеможливають досягнення мети. Тоді системний аналітик повинен ставити перед особою, яка приймає рішення, питання про те, чи не можна послабити чи зовсім зняти ці обмеження. Наприклад, занадто жорсткі вимоги на ймовірність помилкової тривоги призводять до неприйнятно тривалих періодів нагромадження сигналу в радіолокаторі. Як з'ясувалося, така тверда вимога зумовлена лише небажанням занадто часто даремно турбувати вище начальство.

Отже, формуючи критерії, шукають компроміс між повнотою (точністю) опису цілей і кількістю критеріїв. Крім загальних рекомендацій типу викладених вище можна використовувати й практичний досвід дослідження конкретних систем. Так, Е. Квейд наводить такі найчастіше вживані в аналізі складних технічних систем критерії: фінансові (прибуток, вартість тощо), об'ємні (для вимірювання кількості продукту), технічні якісні (ефективність функціонування, надійність тощо), живучість (сумісність із уже наявними системами, пристосованість, або гнучкість, стійкість проти морального старіння, безпека) і т. ін. [56]. Такі емпіричні переліки, безумовно, корисні, але їх слід розглядати лише як основу подальшого пошуку.

Не слід абсолютизувати критичне ставлення до того, що розбіжність між критеріями та цілями неминуча. Давнє прислів'я говорить: "Можна багато пройти в черевиках, які трохи тиснуть".

6.5. Генерування альтернатив

Викладена раніше теорія вибору виходить із того, що задано множину альтернатив, тобто вважають, що вже є з чого вибирати, і питання полягає в тому, як це робити. Це наочний приклад суто формальної постановки задачі: усі основні, принципові труднощі вважають уже перебореними, і мова йде, можна сказати, про технічні труднощі. Але ж саме формування множини альтернатив — найважчий, найбільш творчий етап системного аналізу. Так, А. Холл відзначав: “Стадія пошуків ідей, безсумнівно, являє собою кульмінаційну точку процесу розв’язання задачі, адже без ідей нічого аналізувати й вибирати” [161].

Більше того, усе спрямовано на пошук найкращої альтернативи в заданій множині альтернатив, і якщо в цю множину ми з якихось причин не включили дійсно найкращу альтернативу, то ніякі методи вибору не “обчислять” її.

Генерування альтернатив, тобто ідей про можливі способи досягнення мети — дійсно творчий процес. Тому всі рекомендації щодо того, як самому генерувати нові альтернативи чи як створити умови для того, щоб інші учасники аналізу краще генерували ідеї, — результат колективного досвіду теоретиків і методистів із розв’язання творчих задач. Цей досвід викладено в багатьох книжках, які містять багато цікавої та корисної інформації [2, 18, 19, 32, 144].

Один зі способів структурування будь-якої неформальної діяльності полягає у виявленні та формуванні властивих їй евристик, тобто емпіричних правил, корисність яких обґрунтована лише тим, що вони в багатьох (хоча й не в усіх) випадках зумовлюють успіх. Стосовно процесу генерування альтернатив у літературі з системного аналізу та методів творчості часто описують такі евристики.

6.5.1. Способи збільшення кількості альтернатив

Треба свідомо згенерувати якомога більше альтернатив. Для цього застосовують різні способи:

- пошук альтернатив у патентній і журнальній літературі;

- залучення кваліфікованих експертів, які мають різноманітну підготовку та досвід;
- збільшення кількості альтернатив за допомогою їх комбінування, утворення проміжних варіантів між запропонованими раніше;
- модифікація наявної альтернативи, тобто формування альтернатив, які лише частково відрізняються від відомої;
- розгляд альтернатив, протилежних запропонованим, зокрема “нульової” (не робити нічого, тобто розглянути наслідок розвитку подій без нашого втручання);
- інтерв'ювання зацікавлених осіб і широкі анкетні опитування;
- розгляд навіть тих альтернатив, які на перший погляд здаються нерозумними чи надуманими;
- генерування альтернатив, розрахованих на різні інтервали часу (довгострокові, короткострокові, екстрені).

6.5.2. Створення сприятливих умов

Організуючи роботу на етапі генерування альтернатив, слід пам'ятати про існування факторів, що як гальмують творчу роботу, так і сприяють їй. Виділяють внутрішні (психологічні) та зовнішні фактори.

До внутрішніх факторів відносять такі:

- наслідок неправильного сприйняття дійсності (крайні прояви: або ми сприймаємо те, чого немає, або не сприймаємо того, що є);
- інтелектуальні перешкоди (інерційність мислення, стереотипи, підсвідомі самообмеження, пов'язані з переконаннями, лояльністю, тощо);
- емоційні перешкоди: зайве захоплення критикою інших або, навпаки, острах критики з боку інших; побоювання негативної реакції з боку замовника чи начальства на запропоновані альтернативи, суб'єктивне відношення до улюбленого типу альтернатив (наприклад, деякі затяті прихильники теорії масового обслуговування намагаються звести будь-які задачі до задач черговості).

Дуже впливають на творчі процеси й *зовнішні фактори*. Помічено, що навіть фізичні (погодні та кліматичні) умови позначаються на продуктивності творчої праці. Так, деякі дослідники вважають,

що існує зв'язок між творчою діяльністю цілих народів і географічними умовами їхнього життя. На індивідуальній діяльності позначаються також фізичні умови. Розповідають, що Нільс Бор відпускав студентів із занять, якщо було так спекотно, що віск у пробірці розплавлявся; що М. Тимофєєв-Ресовський одного разу в жаркий день провів засідання міжнародного симпозіуму прямо в ставку, і це було, за спогадами учасників, найплідніше засідання. Відомо також, що на людей негативно впливають сторонні шуми, різні незручності тощо.

Однак найсильніший вплив на індивідуальну творчість справляють суспільні умови, загальне культурне тло, ідейна атмосфера. Схвалення певної соціальної групи — один із найсильніших стимулів для творчості людини.

6.5.3. Способи зменшення кількості альтернатив

Якщо прагнути того, щоб на початковій стадії було отримано якнайбільше альтернатив, то для деяких проблем їх кількість може досягти багатьох десятків. Очевидно, що докладне вивчення кожної з них призведе до неприйнятних витрат часу та засобів. У таких випадках рекомендуються провести “грубе відсіювання”, не порівнюючи альтернативи кількісно, а лише перевіряючи їх на наявність певних якостей, бажаних для будь-якої прийнятної альтернативи.

До ознак “хороших” альтернатив відносять стійкість до зміни деяких зовнішніх умов, надійність, багатоцільову придатність, адаптивність, інші ознаки практичності. Допомогти виконати відсіювання можуть також такі ознаки, як виявлення негативних побічних ефектів, недосягнення деякими важливими показниками контрольних рівнів (наприклад, занадто висока вартість) тощо. Попереднє відсіювання не рекомендується проводити занадто жорстко; для детального аналізу має бути хоча б кілька альтернатив.

Розглянемо тепер деякі організаційні форми генерування альтернатив, що добре зарекомендували себе на практиці.

6.5.4. Мозковий штурм

Метод мозкового штурму спеціально розроблено для одержання максимальної кількості пропозицій. Його ефективність рязуча: “Шість чоловік за півгодини можуть висунути 150 ідей. Бригада проектувальників, яка працює звичайними методами, ніколи не прийшла б до думки про те, що розглянута нею проблема має таку розмаїтість аспектів” (Дж. Джонс) [32].

Техніка мозкового штурму така. Збирають групу осіб, відібраних для генерації альтернатив; основний принцип добору — розмаїтість професій, кваліфікації, досвіду (такий принцип може розширити фонд апріорної інформації, якою володіє група). Повідомляють, що заохочуються будь-які ідеї, що виникли як індивідуально, так і за асоціацією під час вислуховування пропозицій інших учасників, зокрема й ті, котрі лише частково поліпшують чужі ідеї (кожну ідею рекомендують записати на окремій картці). *Категорично заборонено будь-яку критику*; це найважливіша умова мозкового штурму: сама можливість критики гальмує уяву. Кожен учасник по черзі зачитує свою ідею, інші слухають і записують на картки нові думки, що виникли під впливом почутого. Потім усі картки збирають, сортують і аналізують, зазвичай іншою групою експертів. “Загальний вихід такої групи, де ідея одного може навести іншого на щось іще, часто виявляється більшим, ніж загальна кількість ідей, висунутих тією самою кількістю людей, але коли вони працюють поодиноці” (А. Холл) [161].

Кількість альтернатив можна згодом значно збільшити, комбінуючи згенеровані ідеї. Серед отриманих у результаті мозкового штурму ідей може виявитися багато нерозумних і нездійсненних, але “дурні ідеї легко виключаються наступною критикою, тому що компетентну критику легше одержати, ніж компетентну творчість” (М. Одрін, С. Картавов) [106].

Можна навести багато чудових прикладів успішного мозкового штурму. Ось лише один із них, який ілюструє користь заборони критики.

Під час війни проблему протидії мінам і торпедам супротивника на морі було піддано мозковому штурму. Одна з ідей полягала ось

у чому: “Нехай, як тільки буде виявлено міну чи торпеду, уся команда стане до борту та дмухає на неї!”. Цю несерйозну, на перший погляд, ідею не відкинули, і в процесі подальшого аналізу раціональне зерно, що міститься в ній, було трансформовано в пропозицію за допомогою могутніх насосів створювати потоки води, що відштовхують небезпечний об’єкт.

6.5.5. Синектика

Синектика призначена для генерування альтернатив за допомогою асоціативного мислення, пошуку аналогій до поставленої задачі. На противагу мозковому штурму тут мета — не велика кількість альтернатив, а генерування небагатьох альтернатив (навіть єдиної), які розв’язують проблему. Ефективність синектики було продемонстровано розв’язанням конкретних технічних проблем типу “знайти простий принцип устрою приводів із постійною кутовою швидкістю”, “спроєктувати вдосконалений ніж для відкривання консервних банок”, “винайти міцніший дах”, “розробити герметичну застібку для костюма космонавта”; відомий випадок синектичного розв’язання загальнішої проблеми економічного плану: “розробити новий вид продукції з річним потенціалом продажів 300 млн доларів”. Є спроби застосувати синектику в розв’язанні соціальних проблем типу “як розподілити державні кошти в галузі містобудування”.

Суть синектики можна коротко викласти так. Формують групу з п’яти–семи чоловік, відібраних за ознаками гнучкості мислення, практичного досвіду (перевагу віддають людям, які змінювали професії та спеціальності), психологічної сумісності, товарищескості, рухливості (останнє, як стане зрозуміло з викладеного нижче, дуже важливе). Виробивши певні навички спільної роботи, група веде систематичне спрямоване обговорення будь-яких аналогій із проблемою, яку потрібно розв’язати, що спонтанно виникають у ході бесід. Перебирають не тільки три вже відомі види подібності (пряму, непряму й умовну), але й зовсім фантастичні аналогії (останнє означає уявити собі речі такими, не які вони насправді, але якими хотілося б їх бачити; наприклад, можна уявити, що дорога існує тільки безпосередньо під колісьми автомашини).

Особливого значення синектика надає аналогіям, породжуваним руховими відчуттями. Це зумовлено тим, що наші природні рухові рефлекси самі по собі високоорганізовані, і їх осмислення може підказати хорошу системну ідею. Можна запропонувати, наприклад, уявити своє тіло на місці вдосконалювального механізму, “відчутти себе ним” або поставити себе на місце фантастичного організму, який виконує функцію проєктованої системи, тощо. Розкутість уяви, інтенсивна творча праця створюють атмосферу щирого піднесення, характерну для синектики. Однак у новачків бувають психологічні утруднення: муки сумління (“одержуємо гроші за приємне проведення часу”); зарозумілість після вдалого розв’язання першої проблеми; виснаження нервової системи в результаті дуже інтенсивної праці. Успіху роботи синектичних груп сприяє дотримання таких правил:

- 1) заборонено обговорювати достоїнства та недоліки членів групи;
- 2) кожен має право припинити роботу без яких-небудь пояснень у разі найменших ознак втоми;
- 3) роль ведучого періодично переходить до інших членів групи.

У США створено спеціальну фірму “Сінексіс інкорпорејтед”, яка займається консультуванням і навчанням у галузі синектики. На відміну від мозкового штурму для застосування синектики потрібна спеціальна тривала підготовка: “Протягом року п’ять або шість чоловік повинні витратити чверть свого робочого часу на навчання. Група навчених синекторів, які працюють повний робочий день, здатна протягом року знайти прийнятні рішення приблизно чотирьох невеликих і двох великих проблем” (Дж. Джонс) [32].

6.5.6. Розробка сценаріїв

У деяких проблемах (особливо в соціотехнічних) шукане рішення має визначити реальний майбутній перебіг подій. Тоді альтернативи — це різні (уявлювані, але правдоподібні) послідовності дій і подій, що впливають із них, які можуть відбутися з досліджуваною системою. Ці послідовності мають загальний початок (теперішній стан), але потім можливі стани розрізняються все сильніше, що зумовлює проблему вибору. Такі гіпотетичні альтернативні описи того,

що може відбутися, називають **сценаріями**, а розглянутий метод — **розробкою сценаріїв**. Сценарії-альтернативи мають цінність для осіб, які приймають рішення, тільки тоді, коли вони являють собою не просто плід фантазії, а логічно обґрунтовані моделі майбутнього, що після ухвалення рішення можна розглядати як прогноз, прийнятну розповідь про те, “що трапляється, коли...”.

Створення сценаріїв — типова неформалізована процедура; це творча, наукова праця. Проте й у цій справі нагромаджено певний досвід, є свої евристики. Наприклад, рекомендують розробляти “верхній” і “нижній” сценарії — ніби крайні випадки, між якими можливе майбутнє. Такий метод дає змогу іноді компенсувати чи явно виразити невизначеності, пов’язані з пророкуванням майбутнього. Іноді корисно включати в сценарій уявлюваний активно протидійний елемент, моделюючи тим самим найгірший випадок. Крім того, рекомендовано не розробляти детально (як ненадійні та непрактичні) сценарії, занадто “чутливі” до невеликих відхилень на ранніх стадіях. Створення сценаріїв містить такі важливі етапи:

- складання переліку факторів, які впливають на хід подій, із зазначенням осіб, які прямо чи опосередковано контролюють ці фактори;
- виділення аспектів боротьби некомпетентністю, недбалістю та недисциплінованістю, бюрократизмом і тяганиною;
- облік наявних ресурсів.

6.5.7. Морфологічний аналіз

Морфологічний аналіз — простий і ефективний спосіб генерування альтернатив — запропонував Ф. Цвіккі. Цей спосіб полягає у виділенні всіх незалежних змінних проектованої системи, наведенні можливих значень цих змінних і генеруванні альтернатив перебором усіх можливих сполучень цих значень.

Проілюструємо суть морфологічного аналізу на спрощеному прикладі розробки системи телевізійного зв’язку (табл. 6). Ця таблиця породжує $8 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2 = 384$ різні можливі системи. Сучасному телевізійному мовленню відповідають тільки чотири альтернативи: 1.4–2.1–3.1–4.2–5.1–6.1, 1.4–2.1–3.1–4.3–5.1–6.1,

Розділ 6. Про неформалізовані етапи системного аналізу

1.4–2.1–3.2–4.2–5.1–6.1 і 1.4–2.1–3.2–4.3–5.1–6.1. Є привід для роздумів, чому інженери досі не звернули увагу на інші альтернативи.

Таблиця 6

Приклад розробки системи телевізійного зв'язку

Незалежна змінна	Значення змінної
1. Колір зображення	1. Чорно-біле 2. Одноколірне (наприклад, усі відтінки червоного) 3. Двоколірне 4. Триколірне ... 8. Семиколірне
2. Розмірність зображення	1. Плоске 2. Об'ємне
3. Градація яскравості	1. Неперервна 2. Дискретна (оцифрована)
4. Звуковий супровід	1. Без звуку 2. Монауральний звук 3. Стереофонічний звук
5. Передача запахів	1. Без передачі запахів 2. Із супроводом запахів
6. Зворотний зв'язок	1. Без зворотного зв'язку 2. Зі зворотним зв'язком

Кількість варіантів можна збільшити, уводячи нові незалежні змінні (у розглянутому прикладі ввести розміри зображення з градацією від звичайних на сьогодні до розмірів у всю стіну, увести додаткові канали передачі інформації, наприклад шкірно-електричний або тактильний; перейти від однокранної системи до багатокранної тощо).

Одна з основних проблем морфологічного аналізу в разі збільшення кількості змінних — скорочення перебору. Її розв'язують,

накладаючи різні обмеження, що дають змогу відкинути варіанти, які не потрібно розглядати.

6.5.8. Ділові ігри

Діловими іграми називається імітаційне моделювання реальних ситуацій, у процесі якого учасники гри поводяться так, начебто вони в реальності виконують доручену їм роль, причому саму реальність замінено якоюсь моделлю. Приклади ділових ігор — штабні ігри та маневри військових, робота операторів технічних систем (льотчиків, диспетчерів електростанцій тощо) на тренажерах, адміністративні ігри. Найчастіше ділові ігри використовують для навчання, проте їх можна застосовувати й для експериментального генерування альтернатив, особливо в слабко формалізованих ситуаціях. Важливу роль у ділових іграх крім учасників відіграють контрольно-арбітражні групи, які керують моделлю, реєструють хід гри й узагальнюють її результати.

Ми розглянули далеко не всі методи генерування альтернатив. Так, крім наведених методів можна успішно використовувати модифікований метод “Дельфі”; можливі й різні сполучення інших методів. Усі ці методи мають бути ітеративними, щоб на будь-якій наступній стадії системного аналізу можна було породжувати нову альтернативу й аналізувати її. Розглядаючи слабко структуровані (“пухкі”) проблеми, часто знаходять першу ж придатну альтернативу та проводять її покровоке поліпшення, удосконалювання.

6.6. Алгоритми проведення системного аналізу

Як ми вже неодноразово відзначали, удосконалювання будь-якої діяльності полягає в її алгоритмізації, тобто в удосконалюванні технології. Було б щонайменше нелогічно й дивно не підходити з такою самою міркою й до самого системного аналізу: природно порушити питання про те, наскільки його формалізовано.

6.6.1. Труднощі алгоритмізації системного аналізу

Якщо розуміти формалізацію вузько (в ідеалі як математичну постановку задачі й цілком однозначну програму її розв'язання), то системний аналіз у принципі не можна цілком формалізувати, оскільки в ньому дуже важливу роль відіграють етапи, на яких системний аналітик і залучувані ним експерти повинні виконати творчу роботу. Це стосується не тільки системного аналізу, а й наукової праці взагалі. Із цього приводу І. Пригожин та І. Стенгерс пишуть: “Для нас експериментальний метод — воістину мистецтво, тобто ми вважаємо, що в основі його лежать особливі навички й уміння, а не загальні правила. Будучи мистецтвом, експериментальний метод ніколи не гарантує успіху, завжди залишаючись на милості тривіальності чи неправильного судження. Жоден методологічний принцип не може виключити, наприклад, ризику зайти в глухий кут у ході наукового дослідження. Експериментальний метод — це мистецтво постановки цікавого питання та перебору всіх його наслідків, які випливають із теоретичної схеми, що лежить у його основі, усіх відповідей, які могла б дати природа обраною експериментальною теоретичною мовою. Із конкретної складності та розмаїття явищ природи потрібно вибрати одне-єдине явище, у якому з найбільшою ймовірністю чітко й однозначно мають бути втілені наслідки з розглянутої теорії. Це явище потім слід абстрагувати від навколишнього середовища й “інсценувати” для того, щоб теорію можна було піддати відтвореній перевірці, результати й методи якої припускали би передачу будь-якій зацікавленій особі. Хоча така експериментальна процедура із самого початку породжувала (і продовжує породжувати) серйозні дорікання... вона пережила всі модифікації теоретичного змісту наукових описів і в остаточному підсумку визначила новий метод дослідження, уведений сучасною наукою. Експериментальна процедура може ставати й знаряддям чисто теоретичного аналізу. Цей її різновид відомий під назвою уявного експерименту” [123].

Із наведеної цитати очевидно, що сучасний системний аналіз — це просто одна з сучасних прикладних наук; основна його відмінність від інших наук полягає в тому, що немає субстратної специфіки (точніше, її розширено): системний аналіз застосовний до систем

будь-якої природи.

Те, що в арсеналі системного аналізу є як формальні (зокрема математичні) процедури, так і операції, виконувані людьми неформально, і навіть те, що іноді в аналізі взагалі не застосовують формалізовані процедури, не означає, що не можна говорити про алгоритми системного аналізу. Навпаки, вимога системності (у першу чергу, цілеспрямованої структурованості) застосовна насамперед до самого системного аналізу.

Було багато спроб створити досить загальний, універсальний алгоритм системного аналізу. Упадають в око спільність у цілому та розбіжності в деталях наявних алгоритмів. Було б необґрунтованим твердити, що якийсь із них правильніший або універсальніший, ніж інший, що реалізація одного з них — це системний аналіз, а реалізація іншого — ні. Усе стає зрозумілим, якщо згадати, що алгоритм — це прагматична (нормативна) модель діяльності. Вибравши конкретну модель, ми маємо виконувати інструкції саме цього алгоритму, але це не означає, що не можна користуватися іншою моделлю. Із цільового призначення моделей випливає, що для якогось випадку конкретний алгоритм кращий, ніж інший; однак звідси не випливає, що не може бути ще однієї, кращої реалізації алгоритму чи що в якомусь іншому випадку порядок переваги алгоритмів не виявиться протилежним. Утім, і повної незалежності алгоритмів також немає: одні з них можуть бути розширенням інших, частково збігатися тощо.

Дуже зручна та наочна аналогія — програмування розв’язання задачі на ЕОМ. Програміст має в розпорядженні всі оператори якоїсь мови й повинен скласти з них програму розв’язування задачі. Різні програмісти складуть різні програми; одна з них буде вишуканішою; у якійсь із них буде використано новинки; якась виявиться “старомодною”. Однак усі вони розв’язують одну й ту саму задачу. Подібно цьому, системний аналітик може в різній (хоча й не цілком довільній) послідовності використовувати різні операції дослідження систем або спланувати свої дії заздалегідь (для добре структурованих, наприклад технічних, задач), а може вибирати чергову операцію залежно від результату попередньої чи використовувати готовий алгоритм або готові підпрограми аналізу.

6.6.2. Компоненти системних досліджень

Наведемо основні засоби дослідження систем (етапи системного аналізу), тобто блоки, з яких може складатися процедура аналізу конкретної системи, за декількома авторами.

Дослідники Ф. Перегудов і Ф. Тарасенко пропонують такий укрупнений перелік, у якому, утім, може бути інша послідовність операцій; кожну зазначену операцію можна розділити на дрібніші (це й дає змогу складати алгоритми системного аналізу, які мають різний ступінь дрібності):

- 1) визначення конфігуратора;
- 2) визначення проблеми та проблематики;
- 3) виявлення цілей;
- 4) формування критеріїв;
- 5) генерування альтернатив;
- 6) побудова та використання моделей;
- 7) оптимізація (для простих систем);
- 8) вибір;
- 9) декомпозиція;
- 10) агрегування;
- 11) дослідження інформаційних потоків;
- 12) дослідження ресурсних можливостей;
- 13) спостереження й експерименти над досліджуваною системою;
- 14) реалізація, упровадження результатів аналізу [111].

Учений Е. Капітонов виділяє такі послідовні етапи системного аналізу:

- 1) формулювання цілей і основних завдань дослідження;
- 2) визначення меж системи — основи для відділення об'єкта від зовнішнього середовища, розмежування його внутрішніх і зовнішніх зв'язків;
- 3) виявлення суті цілісності, що передбачає охоплення всієї типологічної сукупності зв'язків об'єкта та містить прагнення до абсолютної повноти його зображення;
- 4) визначення побудови системи — поелементного складу;
- 5) аналіз взаємозв'язків елементів системи;

6) побудова структури й організації системи, через які виражено зумовлену стійкими зв'язками впорядкованість системи та спрямованість цієї впорядкованості;

7) виявлення функцій системи та її підсистем;

8) аналіз функціонування, що забезпечує реальну життєдіяльність (роботу) системи;

9) виявлення керованості системи; механізми взаємозв'язку в ієрархічній побудові системи, прямі та зворотні зв'язки функціонування роблять об'єкт керованим;

10) конструювання системної моделі [53].

Автор Ю. Плотинський розглядає системний аналіз як сукупність кроків з реалізації методології системного підходу для отримання інформації про систему; він виділяє такі етапи:

1) формулювання основних цілей і завдань дослідження;

2) визначення меж системи, відділення її від зовнішнього середовища;

3) складання списку елементів системи (підсистем, факторів, змінних тощо);

4) виявлення суті цілісності системи;

5) аналіз взаємозалежних елементів системи;

6) побудова структури системи;

7) установлення функцій системи та її підсистем;

8) узгодження цілей системи та її підсистем;

9) уточнення меж системи та кожної підсистеми;

10) аналіз явищ емерджентності;

11) конструювання системної моделі [113].

Детальнішу схему запропонував Ю. Черняк, який виділяє в процесі системного аналізу 12 етапів і розділяє їх на підетапи, із відповідними їм науковими інструментами системного аналізу.

1. Аналіз проблеми:

1) виявлення проблеми;

2) точне формулювання проблеми;

3) аналіз логічної структури проблеми;

4) аналіз розвитку проблеми (у минулому та майбутньому);

5) визначення зовнішніх зв'язків проблеми (з іншими проблемами);

б) виявлення принципової можливості розв'язання проблеми.

Методи: сценаріїв, діагностичний, “дерева цілей”, економічного аналізу.

2. Визначення системи:

- 1) специфікація завдання;
- 2) визначення позиції спостерігача;
- 3) визначення об'єкта;
- 4) виділення елементів (визначення меж розбиття системи);
- 5) визначення підсистем;
- 6) визначення середовища.

Методи: матричні, кібернетичні моделі.

3. Аналіз структури систем:

- 1) визначення рівнів ієрархії;
- 2) визначення аспектів і мов;
- 3) визначення процесів і функцій;
- 4) визначення та специфікація процесів управління та каналів інформації;
- 5) специфікація підсистем;
- 6) специфікація процесів, функцій поточної діяльності (рутинних) і розвитку (цільових).

Методи: діагностичні, матричні, мережові, морфологічні, кібернетичні моделі.

4. Формулювання загальної мети та критерію системи:

- 1) визначення цілей і вимог надсистеми;
- 2) визначення цілей і обмежень середовища;
- 3) формулювання загальної мети;
- 4) визначення критерію;
- 5) декомпозиція цілей і критеріїв за підсистемами;
- 6) композиція загального критерію з критеріїв підсистем.

Методи: експертних оцінок (“Дельфі”), “дерева цілей”, економічного аналізу, морфологічний, кібернетичні моделі, нормативні операційні моделі (оптимізаційні, імітаційні, ігрові).

5. Декомпозиція мети, виявлення потреб у ресурсах і процесах:

- 1) формулювання цілей верхнього рівня;
- 2) формулювання цілей поточних процесів;
- 3) формулювання цілей ефективності;

- 4) формулювання цілей розвитку;
- 5) формулювання зовнішніх цілей і обмежень;
- 6) виявлення потреб у ресурсах і процесах.

Методи: “дерева цілей”, мережові, описові моделі, моделювання.

6. Виявлення ресурсів і процесів, композиція цілей:
 - 1) оцінка наявних технологій і потужностей;
 - 2) оцінка сучасного стану ресурсів;
 - 3) оцінка реалізованих і запланованих проектів;
 - 4) оцінка можливостей взаємодії з іншими системами;
 - 5) оцінка соціальних факторів;
 - 6) композиція цілей.

Методи: експертних оцінок (“Дельфі”), “дерева цілей”, економічного аналізу.

7. Прогноз і аналіз майбутніх умов:
 - 1) аналіз стійких тенденцій розвитку системи;
 - 2) прогноз розвитку та зміни середовища;
 - 3) передбачення появи нових факторів, що справлять значний вплив на розвиток системи;
 - 4) аналіз ресурсів майбутнього;
 - 5) комплексний аналіз взаємодії факторів майбутнього розвитку;
 - 6) аналіз можливих змін цілей і критеріїв.

Методи: сценаріїв, експертних оцінок (“Дельфі”), “дерева цілей”, мережові, економічного аналізу, статистичний, описові моделі.

8. Оцінка цілей і засобів:
 - 1) обчислення оцінок за критерієм;
 - 2) оцінка взаємозалежностей цілей;
 - 3) оцінка відносної важливості цілей;
 - 4) оцінка дефіцитності та вартості ресурсів;
 - 5) оцінка впливу зовнішніх факторів;
 - 6) обчислення комплексних розрахункових оцінок.

Методи: експертних оцінок (“Дельфі”), економічного аналізу, морфологічний метод.

9. Добір варіантів:
 - 1) аналіз цілей з погляду сумісності та входження;
 - 2) перевірка цілей на повноту;

- 3) відсікання надлишкових цілей;
- 4) планування варіантів досягнення окремих цілей;
- 5) оцінка та порівняння варіантів;
- 6) поєднання комплексу взаємозалежних варіантів.

Методи: “дерева цілей”, матричні, економічного аналізу, морфологічний.

10. Діагностика системи:

- 1) моделювання технологічного й економічного процесів;
- 2) розрахунок потенційної та фактичної потужностей;
- 3) аналіз втрат потужності;
- 4) виявлення недоліків організації виробництва й управління;
- 5) виявлення й аналіз заходів щодо вдосконалення.

Методи: діагностичні, матричні, економічного аналізу, кібернетичні моделі.

11. Побудова комплексної програми розвитку:

- 1) формулювання заходів, проектів і програм;
- 2) визначення черговості досягнення цілей і вжиття відповідних заходів;
- 3) розподіл сфер діяльності;
- 4) розподіл сфер компетенції;
- 5) розробка комплексного плану заходів з урахуванням обмежень щодо ресурсів у часі;
- 6) розподіл обов'язків між відповідальними організаціями, керівниками та виконавцями.

Методи: матричні, мережові, економічного аналізу, описові моделі, нормативні операційні моделі.

12. Проектування організації для досягнення цілей:

- 1) визначення цілей організації;
- 2) формулювання функцій організації;
- 3) проектування організаційної структури;
- 4) проектування інформаційних механізмів;
- 5) проектування механізмів роботи;
- 6) проектування механізмів матеріального та морального стимулювання.

Методи: діагностичні, “дерева цілей”, матричні, мережові, кібернетичні моделі [165].

6.7. Утілення в життя результатів системних досліджень

Отже, кожную систему досліджують із застосуванням будь-яких потрібних методів і операцій системного аналізу (як формальних, зокрема із застосуванням математичних методів і ЕОМ, так і евристичних), а їх послідовність визначає системний аналітик, який веде дослідження; багато в чому ця послідовність має індивідуальний, пристосований до конкретного випадку характер. Тому в системному аналізі переплітаються особливості, властиві як науці, так і мистецтву. Дж. Джонс, говорячи про проектування систем (частинний випадок системного аналізу), висловив цю думку так: “Скажемо відразу, що проектування не слід плутати ні з мистецтвом, ні з природничими науками, ні з математикою. Це складний вид діяльності, у якому успіх залежить від правильного сполучення всіх цих трьох засобів пізнання; дуже мала ймовірність домогтися успіху, ототожнюючи проектування з одним із них..”

Для розв’язання будь-якої задачі проектування потрібне певне поєднання логіки й інтуїції. Способів такого поєднання інтуїтивного з раціональним не виявлено; мабуть, їх і неможливо визначити в загальному вигляді, у відриві від конкретної задачі та конкретної людини, тому що вони залежать від того, скільки об’єктивної інформації є в розпорядженні проектувальника, а також від його кваліфікації та досвіду” [32].

6.7. Утілення в життя результатів системних досліджень

На відміну від теорії систем системний аналіз — прикладна наука; його кінцева мета — зміна ситуації відповідно до поставлених цілей. Тому остаточний висновок про правильність і корисність системного аналізу чи його неправильність можна зробити на підставі результатів його практичного застосування. Це ж залежить не тільки від того, наскільки досконалі й теоретично обґрунтовані методи, використані в ході аналізу, але й від того, наскільки правильно реалізовано отримані рекомендації. У практиці системного аналізу часто трапляється, що особи, які приймають рішення, відкидають хороші

та правильні (як згодом показала практика) результати системних досліджень; інколи впроваджені в практику рекомендації використовують лише доти, доки їх автор сам бере участь у реалізації.

6.7.1. Упровадження результатів системного аналізу в практику

В останні роки в системному аналізі більше уваги стали приділяти проблемам упровадження його результатів у практику. Було виділено самостійний розділ системного аналізу, який, за пропозицією Р. Акоффа, одержав назву теорії практики; його завдання — досліджувати умови ефективності втілення в життя результатів системного аналізу. Жодна, навіть найкраща, теорія практики не сприятиме успіху, якщо сама теорія систем, результати якої потрібно впровадити, недостатньо хороша. І все-таки, як образно висловився Р. Акофф, теорія практики та теорія систем подібні протилежним статям, які потрібні для народження потомства.

Практика системних досліджень і практика впровадження їх результатів, хоча й мають багато спільного, істотно різняться для систем різних типів. У цьому відношенні дуже продуктивна класифікація систем, уведена П. Чеклендом. Він поділяє системи на три типи. До першого належать природні системи, у яких зв'язки утворені й діють природно (фізичні, хімічні, біологічні, екологічні системи тощо). До другого типу належать реальні штучні системи, у яких зв'язки утворено в результаті людської діяльності, хоча ці зв'язки природні (машини, прилади, інші технічні системи тощо). Третій тип систем — соціотехнічні. У результаті участі людей найістотніші зв'язки в таких системах належать не природі, а культурі (вони умовні, мають знаковий характер), і зміст будь-якої ситуації визначається відношенням до неї суб'єкта. Хоча ці зв'язки існують лише в мозку людини (насамперед як цінності), завдяки їх реальній, цілеспрямованій поведінці вони ніби реально існують: “Більшість реальних проблемних ситуацій належать саме до цього типу, як у дрібних масштабах (наприклад, як слід ставитися до батьків, які старіють?), так і у великих (наприклад, чи варто припинити ядерне залякування?)” [177].

Системний аналіз застосовують для дослідження систем усіх

трьох типів. При цьому змістовне, наукове обґрунтування в першому випадку дають природничі науки, у другому — природні та технічні, у третьому — пов'язані з цією проблематикою природні, технічні та гуманітарні науки, сукупність яких визначається природою досліджуваної системи. Очевидно, що частка “пухких”, слабо структурованих проблем найбільша в дослідженнях систем третього типу. Зрозуміло також, що найскладніша й практика їх впровадження.

Свою теорію практики стосовно цього випадку Р. Акофф викладає, узагальнюючи свій багаторічний досвід системного аналізу більш ніж для чотирьохсот приватних і державних організацій у різних країнах.

6.7.2. Потреба в методології впровадження

Спочатку потрібно уточнити поняття. Соціотехнічні системи Р. Акофф називає просто соціальними, визначаючи їх як такі, у яких люди відіграють найістотнішу роль (наприклад, це не водогін, а водоканалізація; не телефон, а управління телефонних мереж). Під практикою розуміють роботу на клієнта, наділеного владою, яка достатня для зміни системи способами, визначеними дослідженням. На початковому етапі й потім у цій роботі обов'язково повинні безпосередньо брати участь усі зацікавлені сторони чи їх представники. Оскільки предмет теорії практики — ефективність практики, дуже важливе таке означення: *під ефективною практикою розуміють поліпшення роботи організації клієнта з погляду хоча б однієї із зацікавлених сторін і непомітність погіршення цієї роботи для всіх інших.* (Варто звернути увагу на гуманістичну вихідну позицію автора. Згодом саме вона привела Р. Акоффа до проблеми етики системного аналізу.)

Потім Р. Акофф уточнив зміст терміна “практичний системний аналітик”: “Не той, хто, стикаючись із проблематикою організації, збирає симптоми, ставить діагноз і виписує рецепт, подібно лікарю, який має справу з пацієнтом. Я маю на увазі тих, хто, надаючи підтримку й допомогу, робить інших здатними справлятися зі своїми проблемами успішніше, ніж вони це зможуть зробити без його допомоги. Отже, системний аналітик більше схожий на вчителя, ніж

на лікаря. Учителі знають, що вони не можуть навчитися чогось замість своїх учнів; учні повинні навчитися самі. Але вчителі можуть допомогти учням навчитися більшого та швидше, ніж вони зможуть це без учительської допомоги” [176].

Однак для Р. Акоффа недостатньо аналогії з учителем. На його думку, системна практика — це насамперед пізнавальний процес не тільки для клієнтів, але й для самих аналітиків: “Якщо вони нічого не вчать в ході роботи з іншими, то вони не практикують, а консультують, ділячись тим, що вони знали заздалегідь. Скажемо інакше: мета практики — підняти рівень розвитку системи клієнта, усіх її зацікавлених сторін і самих аналітиків, залучених до роботи” [176].

Поняття розвитку відіграє в теорії практики Р. Акоффа важливу роль, тому зупинімося на ньому докладніше. *Розвиток означають як збільшення бажання та здатності організації задовольняти свої власні бажання та чужі потреби й виправдані бажання.* Бажання називаються виправданими, якщо їх задоволення заради одних не позначається негативно на розвитку інших. Потреби — це те, що потрібно для виживання. Можливі різні комбінації, наприклад можна не хотіти потрібного й бажати непотрібного.

6.7.3. Зростання та розвиток

Слід розрізнити розвиток і зростання. Це далеко не те саме, і навіть не обов’язково одне пов’язане з другим: “Купа сміття може рости без розвитку. Людина розвивається ще довго після того, як припиняється її ріст. Це, звичайно, очевидно. Менш очевидно, що багато проблем, пов’язаних із розвитком, спираються на припущення, начебто для розвитку економічне зростання потрібне, якщо не достатне, і начебто межі зростання обмежують розвиток” [176].

Розвиток пов’язаний не стільки з наявними ресурсами, скільки з умінням використовувати їх. Він більше залежить від інформаційних, ніж від матеріальних ресурсів. Нестача ресурсів може обмежувати зростання, але не розвиток. У міру розвитку система все менше залежна від наявних ресурсів і все більше здатна добувати чи робити ресурси, яких бракує. Соціальні системи можуть надмірно вирости,

але немає межі їх розвитку. Отже, Р. Акофф пов'язує розвиток із системністю, організованістю.

Розвиток пов'язаний із навчанням, а навчатися за інших неможливо, тому неможливо й розвивати іншу людину чи соціосистему ззовні. Єдиний спосіб розвитку — саморозвиток. Проте можна заохотити й підтримати розвиток інших, але це можна зробити тільки за їхньої участі. Тому Р. Акофф вважає абсолютно неодмінною участь зацікавлених сторін у системній практиці. Якщо деякі з них — малодоступні чи занадто численні групи, то потрібно знайти “хороших” представників цих груп, що іноді не просто, але неодмінно треба зробити. Лише в крайньому разі аналітик має брати на себе представництво окремих зацікавлених сторін, і то лише після спеціального вивчення їхніх інтересів.

6.7.4. Умова добровільності участі в аналізі

Найважливішою рисою участі зацікавлених сторін у системній практиці Р. Акофф вважає її добровільність (якщо участь не добровільна, то вона не може бути ефективною). За спостереженнями Р. Акоффа, зацікавлені особи найбільше схильні брати участь у спробах ефективного розв'язання проблем, коли вони впевнені, що виконано такі три умови:

- 1) їх участь дійсно вплине на отримані результати;
- 2) участь має збуджувати інтерес;
- 3) результати дійсно можна впровадити.

Перша умова найповніше реалізується, якщо кожна зі сторін почуває себе рівноправною в прийнятті рішень. Наприклад, якщо рішення приймають більшістю голосів і одна з зацікавлених сторін має таку більшість, то інші сторони навряд чи добровільно будуть брати участь у роботі. Вихід часто можна знайти в консенсусі, тобто принципі одногосного прийняття рішень (досягти якого часто важко, але рідко неможливо).

Друга умова добровільності участі (зробити її цікавою) можна забезпечити декількома способами. Із досвіду Р. Акоффа, ефективний метод — запропонувати учасникам аналізу почати з ідеального “перепроєктування” розглянутої системи, тобто проектування

такої системи, яку, будь на те їхня воля, вони негайно замінили б на ту, що є. На такий “ідеальний” проект накладають небагато обмежень: він має бути в принципі реалізовним (тобто не чисто науково-фантастичним); задовольняти основним зовнішнім обмеженням (правовим, соціальним, економічним тощо), які діють у реальних умовах; передбачати навченість і адаптивність системи в разі змін зовнішніх умов. Складання такого проекту зазвичай породжує жвавий інтерес, оскільки містить елементи творчої гри та забави, але в міру його виконання учасникам стає все зрозуміліше, що, по-перше, з найважливішими проблемами й можливостями, які є в організації, вони свідомо стикаються вперше, і, по-друге, незважаючи на не дуже реалістичні припущення, спроектовану ними систему зазвичай можна досить близько реально апроксимувати.

6.7.5. Роль відносин між учасниками аналізу

Третя умова (правдоподібність упровадження результатів) виконується лише тоді, коли особи, які приймають рішення, виявляють готовність брати участь у системному дослідженні й у впровадженні його результатів. У вітчизняній літературі ця вимога відома як принцип першої особи. Р. Акофф подає його досить категорично: “Особисто я не стану брати участі в проекті, у якому не хочуть взяти участь відповідальні особи, і я не стану витратити на нього більше часу, ніж вони. Проблеми їхні, а не мої; і якщо вони вважають, що ці проблеми не варті їхнього часу, чому я маю вважати інакше?” [176].

Звичайно, річ тут не в особистих амбіціях; як показує досвід, імовірність упровадження результатів сильно залежить від персональної участі відповідальних осіб у їх одержанні. Крім того, утілення їх результатів у життя залежить від багатьох обставин, іноді несподіваних. Наприклад, Р. Акофф відзначає, що впровадження ймовірніше, якщо за розробку рекомендацій було сплачено (“схоже, що люди не дуже цінують те, що дістається безплатно”); якщо оточення особи, яка приймає рішення (тобто і його керівники, і підлеглі), виявляє цікавість до впровадження (цього можна домогтися залученням їх у “ідеальне проектування”). Але особливо великого значення Р. Акофф надає відношенням взаємної довіри між відповідальними

6.7. Утілення в життя результатів системних досліджень

особами та системним аналітиком: він навіть вважає довіру абсолютно неодмінною умовою, якщо має бути впровадження результатів. Керівник має бути впевнений, що його власні інтереси не буде порушено в процесі впровадження, і дружні відносини з аналітиком дають такі гарантії. За спостереженнями Р. Акоффа, установа таких відносин полегшується за таких умов:

1) обидві сторони можуть відмовитися від продовження роботи в будь-який момент і з будь-якої причини; жодна з них не зобов'язана продовжувати роботу в разі незадоволення її ходом;

2) системний аналітик приділяє достатньо часу навчанню персоналу організації, щоб згодом організація могла виконувати роботу й без нього;

3) системний аналітик не прагне привласнити собі заслуги в одержанні позитивних результатів; навпаки, він усіяко підкреслює заслуги інших учасників (це, до речі, сприяє зростанню його авторитету);

4) системний аналітик висуває професійні вимоги не тільки до якості своєї роботи, але й до умов, створюваних йому для роботи (зокрема, якщо останні не відповідають професійним стандартам — наприклад, щодо повного доступу до потрібних осіб та інформації, — роботу слід припиняти);

5) системний аналітик повинен відкрито й широко виявляти повагу до інтелекту відповідальної особи, яка приймає рішення (зрозуміло, що без підлабузництва).

6.7.6. Проблеми та способи їх розв'язання

Говорячи про впровадження результатів системного аналізу, важливо наголосити, що в реальному житті дуже рідко, та й то лише стосовно простих систем, буває так, що спочатку проводять дослідження, а потім упроваджують його результати в практику. У разі системного дослідження соціальних і соціотехнічних систем вони змінюються з часом як самі по собі, так і під впливом дослідження. Так, П. Ріветт пише: «Панувала думка, що існують чітко окреслені проблеми зі зрозуміло визначеним набором цілей і обмежень і що можна, так би мовити, зупинити світ, зійти з нього, щоб побудувати модель,

а потім увійти в нього знову. Так було, інколи так і залишається, і саме тоді формальне математичне моделювання — могутній і достатній засіб. Але трапляється, що життя тече не зупиняючись, і дослідник виявляється не на березі, спостерігаючи, як ріка життя тече мимо, а в тендітному човні, що мчить бистриною” [184].

У процесі аналізу змінюються стан проблеми, цілі, кількість і персональний склад учасників, відносини між зацікавленими сторонами, а реалізація прийнятих рішень впливає на всі фактори функціонування системи. Відбувається фактичне злиття етапів дослідження та впровадження, що надає системному аналізу специфічного характеру: проблеми мають не “зважуватися”, а ніби “розчинятися”, “зникати” в ході активного дослідження.

Пояснімо цю думку. Є принаймні чотири способи поведінки з будь-якою проблемою реального життя. Перший (Р. Акофф називає його *absolution*) — не розв’язувати проблему, сподіваючись, що вона зникне сама собою. Другий (*resolution*) — зробити що-небудь, що частково розв’язує проблему, пом’якшує її до прийняттого стану. Третій (*solution*) — розв’язати проблему якнайкраще в певних умовах (оптимально). Нарешті, четвертий (*dissolution*) — ліквідувати, розчинити проблему, змінивши умови, зробивши в системі чи її оточенні такі зміни, щоб не тільки зникла сама проблема, але й система могла перебороти майбутні проблеми самостійно. Цей спосіб реалізовано в найбільш розвинених формах системного аналізу.

6.7.7. Роль етики в системному аналізі

Насамкінець розглянемо ще один розділ теорії практики, присвячений питанням етики, тобто моралі та моральності. Потрібно обов’язково вивчати ці проблеми, бо не буває етично нейтральних системних досліджень. Річ не просто в тому, що, як тільки йдеться про суб’єктивні цілі та засоби їх досягнення, ми неодмінно виявляємося причетними до проблем етики. У теорії практики основний акцент зроблено на етиці самих системних досліджень.

З одного боку, системні дослідження мають багато спільних рис зі “звичайними” науковими дослідженнями, зокрема багато загальних етичних норм: наукову сумлінність, чесність, об’єктивність,

відданість істині, вимогливість до власної компетентності, норми спілкування з колегами за професією. З іншого боку, у системному аналізі крім фактичних (“наукових”) істин потрібно враховувати людські цінності, психологічні моменти відносин між людьми, погано вивчені й далекі від формалізації інтереси конкретних людей. Це помітно підсилює значення етичних аспектів у поведінці системного аналітика.

Наприклад, одна з небезпек (“пасток”) у системному аналізі — нав’язування системним аналітиком своєї думки особі, яка приймає рішення. Етика поведінки системного аналітика полягає в тому, щоб не бути “сірим кардиналом”, тобто:

- не приховувати альтернатив, які чомусь не подобаються йому самому; доводити їх до відома особи, яка приймає рішення;
- явно повідомляти про припущення, що лежать в основі отриманих висновків;
- звертати увагу особи, яка приймає рішення, на стійкість або чутливість альтернатив до зміни умов.

У чомусь системний аналітик повинен іти на компроміси. Наприклад, тільки для того, щоб завоювати довіру замовника, йому варто включати в моделі деталі, які той вважає істотними, хоча сам аналітик дотримується протилежної думки. Однак далеко не завжди компроміси настільки безболісні та дозволені. Наприклад, потрібна певна сміливість, щоб запропонувати відповідальній особі альтернативу, яку той сприйме негативно, хоча аналіз показує її високу ефективність.

Системний аналітик опиняється перед етичним вибором, коли його принципи суперечать принципам замовника. Й. Дрор сформулював кілька етичних правил для системного аналітика в такій ситуації:

- не працювати на клієнта, який не надає доступу до інформації та не дозволяє публікувати результати;
- відмовлятися виконувати аналіз тільки для обґрунтування вже прийнятого рішення;
- не працювати на клієнта, чії цілі та цінності суперечать гуманістичним цілям і цінностям, а також власним переконанням аналітика [179].

Категоричність цих правил у процесі реалізації нашоухується на так звані складності життя. Етика — справа не примусова, а добровільна. Наприклад, відомий кібернетик С. Бір виконував системні дослідження проблем Чилі на замовлення уряду С. Альянде, але відмовився працювати на запрошення А. Піночета, хоча йому після цього доводилося вживати заходів особистої безпеки. Однак складності можуть бути закладені й не в персональних проблемах.

Дослідження багатьох систем, узагальнені У. Черчменом, показали, що реальні системи насправді служать не тим цілям, заради яких їх було створено, а цілям людей, котрі працюють у цій системі. Як приклади наводять галузі промисловості, у яких інтереси виробників поставлено вище інтересів споживачів; систему торгівлі, у якій інтереси продавців вище інтересів покупців; можна навести аргументи за те, що в лікарнях інтереси лікарів часто вище інтересів хворих, а в навчальних закладах інтереси викладачів вище інтересів студентів. Можливо, “егоїзм систем” так само природний і потрібний, як і егоїзм особистості? Питання полягає в тому, як поводитися з системою, “егоїзм” якої виходить за розумні межі.

Беззастережна відмова працювати на неетичну систему не завжди виправдана. Інколи є надія, що така робота може змінити етику системи на краще.

Запитання та завдання до розділу 6

1. Що таке системний аналіз?
2. У чому полягає задача формулювання проблеми? У чому її особливість?
3. Чим проблема відрізняється від проблематики? Як проблема перетворюється в проблематику?
4. Які ви знаєте методи побудови проблематики?
5. Що таке виявлення цілей? Яка небезпека виникає при цьому?
6. Як цінності впливають на цілі? Наведіть приклади.
7. У чому полягає проблема множинності цілей?
8. Як проходить процес формування критеріїв?
9. Як на формування критеріїв впливають обмеження?

10. У чому полягає задача генерування альтернатив? У чому її складність? Наведіть приклади.

11. Які ви знаєте способи збільшення кількості альтернатив?

12. Які умови сприяють творчій роботі на етапі генерування альтернатив?

13. Які ви знаєте способи зменшення кількості альтернатив? Коли виникає потреба в цьому? Наведіть приклади.

14. У чому полягає метод мозкового штурму? Коли його застосовують?

15. Чим займається синектика? Охарактеризуйте її методи.

16. Що таке розробка сценаріїв? До якого типу систем її найчастіше застосовують?

17. У чому полягає метод морфологічного аналізу?

18. Що таке ділові ігри? Коли їх використовують? Наведіть приклади.

19. У чому полягають труднощі алгоритмізації системного аналізу?

20. Наведіть основні засоби системного аналізу.

21. Які проблеми виникають у процесі втілення в життя результатів системного аналізу?

22. Чим зростання відрізняється від розвитку? Наведіть приклади.

23. Чи обов'язково участь в аналізі має бути добровільною? Відповідь обґрунтуйте.

24. За яких умов полегшуються відносини між учасниками системного аналізу?

25. Наведіть приклади способів розв'язання проблем реального життя.

26. Яку роль у системному аналізі відіграє етика?

Розділ 7

СИНЕРГЕТИКА

7.1. Синергетика як новий напрям наукових досліджень

Термін “синергетика” як назву нового міждисциплінарного напрямку досліджень увів Герман Хакен у курсі його лекцій, прочитаних у 1969 р. в університеті Штутгарта. Сучасна синергетика займається вивченням складних систем, що складаються з багатьох елементів, частин, компонентів, які складно (нелінійно) взаємодіють. Вибір цього терміна професор Г. Хакен пояснює так: “Я вибрав тоді слово “синергетика” тому, що за багатьма дисциплінами в науці було закріплено грецькі терміни. Я шукав таке слово, яке б виражало сумісну діяльність, загальну енергію що-небудь робити, бо системи самоорганізуються, і тому може здатися, що вони прагнуть породжувати нові структури... Я мав на меті привести до руху нову галузь науки, яка займається вищезазначеними проблемами. Уже тоді я бачив, що існує разюча подібність між абсолютно різними явищами, наприклад між випромінюванням лазера та соціологічними процесами чи еволюцією, що це має бути лише вершиною айсбергу. Правда, у той час я не підозрював, що ця галузь може впливати на настільки віддалені галузі дослідження, як, наприклад, психологія та філософія” [137].

Зрозуміло, що синергетика — далеко не єдиний науковий напрям, який займається вивченням складних систем. Водночас використувані в ній поняття роблять синергетичний підхід унікальним, причому не лише в концептуальному, але й в операціональному плані. На відміну від інших наукових напрямів, які зазвичай виникали на стику двох наук, коли одна наука давала новому напрямку предмет, а інша — метод дослідження, синергетика спирається на подібність математичних моделей, ігноруючи різноманітну природу описуваних ними систем.

Поза увагою всіх наук, котрі займаються вивченням складних систем, які складаються з багатьох частин, що взаємодіють, залишається велика кількість інформації, яку потрібно опрацьовувати для отримання детального опису системи. Щоб зменшити обсяг інформації до прийнятних розмірів, удаються до так званого “стиснення інформації”, яке зазвичай супроводжується її частковою втра-тою. У синергетичному підході стиснення інформації відбувається без будь-яких втрат — за допомогою переходу від змінних або параметрів стану до параметрів порядку на основі принципу підпорядкування, причому параметри порядку являють собою функції параметрів стану (принцип колової причинності).

Синергетика, її ідеї, поняття та методи застосовні не лише до фізичних систем, але й до значно складніших біологічних, зокрема до людини як біологічної особини та як члена суспільства. Синергетику успішно застосовують у дослідженні моторної діяльності людини та функціонування найскладнішого з відомих об’єктів — людського мозку.

Синергетичне уявлення про процеси самоорганізації складних і надскладних систем склалося на основі вивчення нерівноважних термодинамічних процесів; його розробляли фізики та математики. Водночас вони висловлювали впевненість, що основні синергетичні закономірності мають загальний характер, розповсюджуючись і на інші рівні буття природи, і на соціокультурні процеси, тим самим потрапляючи у сферу компетенції філософії.

Подальший хід розробки цієї проблематики показав, що синергетична теорія продовжує цікавити насамперед представників природничих наук і філософів, які спираються саме на це коло

наукових дисциплін, але вважають свої висновки загальними для всіх сфер буття. Цей тезис точно сформулював Г. Хакен: “Питання про те, чи існують загальні принципи, що керують виникненням структур і (або) функцій, що саморганізуються, — основне питання синергетики... Системи, що складаються з настільки різноманітних за своєю природою компонентів, як електрони, атоми, молекули, фотони, клітини, тварини та навіть люди, мають, самоорганізуючись, підкорятися одним і тим самим принципам” [158].

Суть проблеми полягає в тому, що природні системи у певному розумінні однорівневі, однакісні, однорідні, а антропосоціокультурні — багаторівневі, бо їх утворено різними силами — природними, соціальними, культурними. Зрозуміло, що оскільки складне містить у собі просте, закони природного буття не можуть не відбитися на бутті людини, суспільства, культури, і це неважко показати, аналізуючи будь-які системи певного класу. Однак зовсім не просто, хоч і вкрай потрібно зрозуміти й показати, як просте переростає тут у складне та як у структурі, функціонуванні й розвитку цього складного народжуються нові, емерджентні його властивості, сили та здатності.

Наведемо приклад. Лінгвістика вивчає будову, функціонування та розвиток мови як складного системного утворення, закони організації якого діють у всіх сферах її використання людьми як основного засобу їх комунікації та спілкування. Якщо біолог, етолог, зоопсихолог вивчає одну з мов тварин, він знаходить принципову якісну відмінність цих форм комунікацій від словесної мови людей, яка переконує, що застосування до сигнальних систем тварин поняття “мова” — лише метафора. З іншого боку, так само непродуктивним було б переносити структуру повсякденної, ділової, навіть художньо-прозаїчної мови на якісно відмінну від неї структуру поетичної мови, у якій і дотримуються правил граматики, і порушують їх, якщо потрібно виразити певний поетичний зміст, а правила семантики, що потребують однозначного — термінологічного — використання слова, ускладнюються внаслідок цілеспрямованої — метафоричної — “гри” на багатозначності слова. Отже, щоб зрозуміти надкомунікативну сутність словесної мови, так само як надграматичну природу поетичної, потрібно в обох випадках приводити методологію дослідження

у відповідність до рівня складності досліджуваного тексту.

Останнім часом виконано низку цікавих і перспективних досліджень розробки окремих аспектів соціальної синергетики (В. Бранський, В. Василькова, А. Назаретян та ін.) [17, 16, 21, 98, 132, 138, 139]. Однак у всіх цих роботах не поставлено питання про особливості самої синергетичної методології вивчення позаприродних процесів, а без цього конкретні дослідження приречені на довільність і емпіричну безсистемність.

7.2. Генезис методології синергетики

Генезис сучасної методології синергетики, напевно, слід вести від Анрі Пуанкаре. З його іменем пов'язані фундаментальні результати, що являють собою підґрунтя сучасної теорії динамічного хаосу для більшості механічних систем, й ідея становлення в скороченому описі — теорія біфуркацій. Саме від нього можна простежити дві лінії:

1) погляд на становлення зсередини, коли спостерігача включено в систему, і його спостереження за нестабільною системою, діалог із нею вносять неконтрольовані збурення, що особливо яскраво продемонструвала квантова теорія;

2) погляд іззовні, коли система структурно стійка, і дією спостерігача на систему можна знехтувати.

Останній підхід — погляд іззовні — відповідає грубому опису, коли уявлення про кризу зведено в одну точку — **точку біфуркації**. (Біфуркацією називається набуття нової якості в рухах динамічної системи за малої зміни її параметрів, тобто точка біфуркації — це точка, у якій траєкторію руху динамічної системи неможливо описати за допомогою “старих” параметрів; у цій точці система чутлива до найменших змін параметрів і випадкових впливів, і передбачити її майбутню траєкторію майже неможливо.)

Найуживаніший синергетичний метод — це перш за все застосування **теорії катастроф**. Ідея полягає в тому, що спочатку задано онтологію лише одного структурного рівня — змінні, у термінах яких записують біфуркаційне рівняння для параметрів порядку системи.

Його розв'язок неоднозначний, за винятком однієї точки біфуркації, де він нестійкий і стрибком переходить на стійку гілку: відбувається зміна онтології по горизонталі. Це погляд іззовні. Тут не зрозуміло, що таке точка нестабільності, становлення. Усі механізми хаосу “за кадром”; від одного стану гомеостазу ми відразу переходимо до іншого. Система майже завжди стійка, і спостерігач (точніше, мета-спостерігач) цілком класичний.

У цьому підході можна виявити передкризові явища — так звані прапори катастроф: критичне сповільнення характерних ритмів системи, збільшення амплітуди можливих флуктуацій¹ вікна параметра порядку, що “вмирає”, в околах точки катастрофи. Рівень загальності теорії катастроф такий, що її моделі, добре відомі у фізиці фазових переходів, нині починають застосовувати в економіці, психології, мистецтві. Наприклад, перед економічною кризою настає добре відомий нам стан стагнації, коли характерні періоди обігу капіталу помітно збільшуються. Ці самі ефекти можна спостерігати в явищах природи: затишшя перед бурєю, у процесі творчості, у поетичних образах.

Розглянемо тепер питання тонкої структури кризи. Слід виділити три її етапи:

- 1) занурення в хаос;
- 2) буття в хаосі;
- 3) вихід із хаосу — самоорганізація.

У цьому підході ми неодмінно стикаємося з актуалізацією в принципі нескінченної кількості ієрархічних рівнів і онтологічних планів становлення, нескінченної чутливості нестабільної системи до зовнішніх впливів з боку як всесвіту, так і спостерігача, із принциповою відкритістю та причетністю в стані хаосу до всього, що відбувається, і можливістю каналізування ззовні деяких принципів, що не проявляються в стані гомеостазу². Тут спостерігач не може бути

¹ **Флуктуацією** (від лат. *fluctuatio* — коливання) називають випадкові відхилення фізичних величин від їх середніх значень; вони відбуваються з будь-якими величинами, що залежать від випадкових факторів. Флуктуації характерні для будь-яких випадкових процесів.

² **Гомеостазом** (від гр. *homoiōs* — подібний і *stasis* — непорушність, стан) називають відносну динамічну постійність складу та властивостей внутрішнього

класичним, зовнішнім: його з неодмінністю включено до системи.

Сьогодні найбільше вивчено стадію переходу до хаосу. Саме тому динамічний хаос поширений не лише у фізиці та природничих науках, але й у суспільстві, психіці, творчості.

Динамічний хаос — неперіодичний рух у детермінованих системах (де майбутнє однозначно визначене минулим), який має скінченний горизонт прогнозу.

Із погляду математики можна вважати, що будь-яка динамічна система, хоч би що вона не моделювала, описує рух точки у фазовому просторі¹. Найважливіша характеристика цього простору — його розмірність, або, простіше, кількість чисел, які потрібно задати для визначення стану системи. Із математичного та комп'ютерного погляду не так уже й важливо, що це за числа — кількість вовків або зайців на певній території, змінні, що описують сонячну активність або кардіограму, чи частка виборців, які підтримують президента. Якщо вважати, що точка, рухаючись у фазовому просторі, залишає за собою слід, то динамічному хаосу відповідає клубок траєкторій. Для визначення коливань, які відповідають динамічному хаосу, Д. Рюель і Ф. Такенс у 1971 р. запропонували назву — **дивний атрактор**.

На певному етапі розвитку дерева біфуркації чи в разі виникнення дивного атрактора настає стадія динамічного хаосу, яка несе в собі як багатство можливих структур, так і неможливість їх повного осягнення. Слідкувати за траєкторією стає дедалі важче, тому вводять мову статистичного опису; однак, на відміну від задачі великої кількості частинок — термодинамічного хаосу, — тут складність має принципово іншу природу — динамічний хаос. Зазвичай це режими так званих необчислювальних систем, коли траєкторії заповнюють геометричні об'єкти фрактальної природи.

середовища та стійкість основних функцій.

¹**Фазовим простором** у класичній механіці та статистичній фізиці називають багатовимірний простір, на осях якого відкладають значення узагальнених координат й імпульсів усіх частинок системи; отже, кількість вимірів фазового простору дорівнює подвоєній кількості степенів вільності системи. Стан системи відображається точкою у фазовому просторі, а зміни стану в часі — рухом точки вздовж лінії, яку називають фазовою траєкторією.

Але завжди система має паростки всього різноманіття структур, розпізнаваних у хаосі. Отже, можна було б зіставити принцип “буття в становленні” — суміш стихій, що, напевно, і має бути в реальному житті, не лише тоді, коли структуру видно на одному масштабі, а хаос на іншому, але й коли вони співіснують одночасно в одній реальності.

Нарешті, процес переходу від хаосу до порядку — народження параметра порядку, вибір серед альтернатив і потенцій — момент істини явища природи. Те, що часто називають самоорганізацією, — це її завершення, просто спотережуваний хаос-порядок — процес виходу на атрактор із межі області її тяжіння. Але річ у тому, що в стадії хаосу ще нема розвинуеного атрактора: він іще має народитися. Певно, можна сподіватися на декілька сценаріїв самоорганізації. Перший — повільний, коли якась локальна квазістабільна структура починає конкурувати з іншими просторовими структурами, поступово збільшуючись; тоді вибір альтернативи пов’язаний із тим, у якій із них опинилася система в момент виходу з режиму хаосу внаслідок зміни зовнішніх умов, а ймовірність, відповідно, — з часткою часу перебування в ній. Другий сценарій — народження параметра порядку — це перехід від безструктурного однорідного хаосу, коли відбувається явище чисто колективного виникнення структур, боротьби флуктуацій. Третій — низка обернених біфуркацій, що огортають, завуальовують процес стабілізації структури.

Динамічний хаос має ще одну чудову властивість — він відкриває систему зовнішньому світу. У цьому режимі вона оголена й беззахисна перед будь-якими як завгодно малими зовнішніми впливами. Поняття замкненої ізольованої системи стає недосяжною ідеалізацією. Система вступає в діалог із Всесвітом, вона причащається універсуму, відчуває себе його частиною й подобою. Саме в хаотичній еволюційній фазі можливі сприйняття, отримання інформації з цілісного джерела, синхронізація та гармонізація системи згідно з космічними принципами. У цьому, напевно, поряд із внутрішніми джерелами, і приховано креативне, творче джерело хаосу. Це комунікативна функція хаосу. У науці цей феномен починають усвідомлювати через ефекти синхронізації годинників, біологічних ритмів організмів, співтовариств, пов’язаних, на перший

погляд, знехтувано малими взаємодіями довільної природи. Напевно, просторово-часові структури синхронізуються внаслідок комунікації за допомогою своїх хаотичних і стабільних компонентів; можливо, у цьому приховано розгадку розуміння гармонії.

7.3. Принципи синергетики

Синергетичний підхід — це розвиток системного підходу, зумовлений потребою у вивченні систем, що саморозвиваються. Хоча процеси самоорганізації мають загальний характер, найвища їх форма — розвиток антропосоціокультурних систем — найвища в тому розумінні, що в них не тільки складність будови помножено на складність розвитку, але й що останню породжено свідомо-цілеспрямованою діяльністю людини.

У спрощеному вигляді можна запропонувати сім основних принципів синергетики.

Два принципи буття:

- 1) гомеостатичність;
- 2) ієрархічність —

характеризують фазу стабільного функціонування системи, її жорстку онтологію, прозорість і простоту опису, принцип ієрархічного підпорядкування Г. Хакена (змінні, що існують довго, підпорядковують ті, що існують недовго), наявність стійких дисипативних¹ структур-атракторів, на яких функціонує система.

П'ять принципів становлення:

- 1) нелінійність;
- 2) нестійкість;
- 3) незамкненість (ті три “не”, яких усіяко уникала класична методологія та які дають системі змогу ввійти в хаотичну креативну

¹Дисипацією (від лат. *dissipatio* — розсіювання) називають розсіювання будь-якої природи, наприклад газів земної атмосфери в міжпланетний простір. У фізиці важливу роль відіграє дисипація енергії — перехід частини енергії впорядкованих процесів (кінетичної енергії тіла, що рухається, енергії електричного струму тощо) в енергію неупорядкованих процесів, в остаточному підсумку — у тепло.

фазу; зазвичай це відбувається внаслідок позитивних зворотних зв'язків);

4) динамічна ієрархічність (узагальнення принципу підпорядкування на процеси становлення — народження параметрів порядку, коли доводиться розглядати взаємодію більш ніж двох рівнів і сам процес становлення — це процес зникнення, а потім народження одного з них у процесі взаємодії мінімум трьох ієрархічних рівнів системи; тут, на відміну від фази буття, змінні параметра порядку, навпаки, найшвидші, нестійкі);

5) спостережуваність (відносно категорій порядку та хаосу до рівня спостереження, масштабу просторово-часового вікна, що може навіть перетворити хаос у стабільне функціонування).

Саме останні два принципи включають принципи додатковості та відповідності, кільцевої комунікативності та відносності до засобів спостереження, запускаючи процес діалогу внутрішнього спостерігача та метаспостерігача.

У синергетиці процес народження ієрархічного рівня — це результат взаємодії двох найближчих рівнів:

$$\begin{array}{l} + \text{ Керувальні надповільні параметри верхнього рівня} \\ \text{Змінні нижчого рівня, що існують недовго} \\ \hline \text{Параметри порядку, структуротвірні} \\ \text{змінні мезорівня, що існують довго.} \end{array}$$

7.4. Умови саморозвитку складних систем

Синергетика являє собою більше парадигму, ніж теорію. Це спосіб мислення про складні системи та їх еволюцію. Саме за допомогою синергетики побудовано конструктивні моделі самоорганізації фізичних і біологічних систем, еволюції екологічних і соціальних систем, а також пояснено багато феноменів у природничих і гуманітарних галузях.

Синергетичний підхід дає змогу сформулювати такі неодмінні умови саморозвитку складних систем:

- відкритість системи;
- складність;
- нелінійність;
- наявність зворотних зв'язків;
- нестійкість (біфуркації, фазові переходи);
- взаємопереходи хаосу та порядку;
- наявність механізмів відбору;
- кооперативність процесів.

Потребу в випадкових складових і керувальних впливах (хаосі) у складній системі для саморозвитку давно виявлено в загальній теорії систем. Для будь-яких соціальних систем такі складові не лише неминучі, але й неусувні; часто вони служать зародками нових тенденцій і структур. У точках нестійкості навіть мікрофлуктуації можуть спричинити істотну зміну траєкторії розвитку системи й подальші якісні зміни на макрорівні. Водночас випадкові складові в керувальних впливах і в структурі системи можуть сприяти підвищенню функціональної стійкості систем і в складних системах їх потрібно спеціально вводити для підвищення стійкості. Нове народжується внаслідок випадковості, яка являє собою перетин незалежних причинних рядів.

Із синергетичного розгляду функціонування складних відкритих і нелінійних систем впливають такі загальні закономірності розвитку:

- необоротність;
- розвиток відбувається через нестійкість, у точках біфуркації відбувається перехід до якісно іншого стану;
- нове з'являється в результаті біфуркацій як непередбачуване, але водночас наявне в спектрі можливих станів;
- у нелінійному середовищі наперед задано всі майбутні стани, проте актуалізується лише один (у точці біфуркації);
- теперішнє не лише визначається минулим, але й формується з майбутнього;
- хаос руйнівний для складних систем, але він і твірний під час переходу в нові стани;
- у певних режимах флуктуації на мікрорівні зумовлюють макроскопічний ефект;

- часто відбувається швидко, нелінійне зростання, загострення фронтів;

- резонансні явища.

Майбутні стани складних систем вислизують від нашого контролю та передбачення. Майбутнє неоднозначне. Водночас існують певні спектри цілей розвитку, наявні в будь-якому відкритому нелінійному середовищі (системі). Вибираючи довільний шлях еволюції, ми повинні усвідомлювати, що він може бути нездійсненим у даному середовищі з певними його внутрішніми властивостями. Не які завгодно структури можуть самопідтримуватися як метастабільно стійкі в даній системі. Тільки певні структури зі спектра потенційно можливих можуть виникнути, оскільки вони “дозволені” власними властивостями системи, відповідають їм. Це — своєрідні еволюційні правила заборони.

Структури-атрактори — це цілі еволюції, “мовчазне знання” самого середовища. Усі впливи та спроби побудувати організацію, які виходять за межі області тяжіння (“конуса”) одного з атракторів, виявляються марними. Усе, що не відповідає структурам-атракторам, буде змито, знищено дисипативними процесами. Наприклад, людина може прагнути діяти проти всіх сил, які “тягнуть” із майбутнього, діяти наперекір внутрішнім тенденціям. Але всі такі спроби приречені на провал. Після проходження точки біфуркації певна структура-атрактор детермінує хід історичних подій. Майбутнє впливає зараз, у певному розумінні воно вже існує в теперішньому. Ми будемо майбутнє, але в якісь моменти воно будує нас.

Майбутні форми складних соціальних організацій відкриті у вигляді віяла переддетермінованих можливостей. Виходи в майбутнє вузькі. Існують певні “коридори” еволюції.

Незважаючи на існування цілого набору можливих еволюційних шляхів, багато структур-атракторів залишаються прихованими, не проявленними. Багато можливостей залишаються нездійсненими. Безліч внутрішніх цілей не можуть бути досягнені за даних параметрів нелінійного середовища. Виявляється, що багато речей залишаються в невидимому для нас, латентному світі, світі можливостей, що вирують.

Існування **дивних**, або **хаотичних**, атракторів — один з фунда-

ментальних фактів у теорії самоорганізації складних систем. Дивні атрактори відкрито до теперішнього часу практично всюди, починаючи з метрології та фізики плазми й закінчуючи нейрофізіологією, вивченням різноманітних типів активності людського мозку.

Дивні атрактори показують нам межі передбачуваності еволюційних процесів та існування галузей принципово непередбачуваності явищ. Наприклад, згідно з переконанням більшості експертів, нині принципово неможливо прогнозувати погоду на три–п'ять тижнів наперед, тобто давати середньотермінові прогнози. Імовірна, хаотична поведінка динамічних складних систем зумовлена не обмеженістю наших інструментів дослідження, а самою природою цих систем.

“Горизонт передбачуваності” можна тлумачити й дещо інакше — як “глибину пам'яті” складних нелінійних систем. Він дає характерний часовий масштаб, який визначає, на яких часових проміжках позначаються зміни початкових даних на величину ε , а також показує, наскільки швидко система “забуде” наслідки наших дій, якщо ми можемо змінити її стан на ε . Власне кажучи, горизонт прогнозу характеризує “пам'ять” досліджуваного об'єкта.

Складність структури пов'язана з **когерентністю** — узгодженням темпів життя структур за допомогою дифузійних, дисипативних процесів, що являють собою макроскопічний прояв хаосу. Для побудови складної організації потрібно когерентно об'єднати підструктури всередині неї, синхронізувати темп їх еволюції. У результаті об'єднання структури потрапляють в один темпосвіт, набувають одного й того самого моменту загострення, починають “жити” в одному темпі.

Для створення складної структури, очевидно, потрібно вміти з'єднувати структури “різного віку”, які розвиваються в різному темпі; потрібно вмикати елементи “пам'яті”. Динаміка розвитку складної структури потребує узгодженого (з одним моментом загострення) розвитку підструктур “різного віку” всередині неї, а це зазвичай призводить до порушення просторової симетрії. Включення “пам'яті” (елементів минулого) означає порушення симетрії в просторі.

Коеволюція — це не об'єднання еволюційних форм по крихтах, а синтез великих структурних блоків, цілісних еволюційних структуроутворень. Процес коеволюції проходить стрибкоподібно,

відбуваються переходи від однієї структури-атрактора до іншої. Стаючи частиною цілого, структурні блоки деформуються, оскільки потрапляють в інше середовище з іншими властивостями й іншими правилами складної поведінки.

Фактор об'єднання складних соціальних структур — це певний аналог хаосу, флуктуацій, дисипації, ринок в узагальненому розумінні цього слова. Отже, хаос (тобто різні обмінні процеси) відіграє конструктивну роль не лише в процесах вибору шляху еволюції, але й у процесах побудови складного еволюційного цілого. Фігурально кажучи, хаос — це “клей”, який зв'язує частини в єдине ціле.

Існують два різні та взаємно доповнювальні режими у відкритих і нелінійних середовищах: **HS-режим** і **LS-режим із загостренням**. HS-режим — це режим хвилі, що необмежено розбігається, коли немає локалізації, і всі структури, неоднорідності стираються, розмиваються. LS-режим із загостренням — це режим хвилі горіння, що збігається, режим локалізації й інтенсивного розвитку процесів у все вужчій області поблизу максимуму. Чергування цих режимів відбувається у відкритих середовищах (системах) із сильною нелінійністю.

Якщо складна структура починає розвиватися не просто в режимі стабілізації, а в режимі спадання активності та хвилі, що необмежено розбігається, тобто ніби в режимі “відпочинку” та “сну” складної організації, то сьогоднішні процеси в центрі цієї структури — це індикатор того, як вони проходили у всій структурі в майбутньому. Але цей режим нестабільний. За певних умов протягом достатньо тривалого часу в центрі цієї структури відбувається дотик необмежено віддаленого від нас (абсолютного) майбутнього людства. Такий режим відповідає так званому третьому стану людини — сну без сновидінь, який індує вважають найбільшою таємницею. Здається, що відбувається певна гармонізація, звірення поточного ходу процесів із метою, “майбутнім порядком”.

Отже, синергетичний підхід дає змогу побачити реальні риси майбутньої організації, аналізуючи наявну просторову конфігурацію складних структур, що еволюціонують, певних швидких еволюційних процесів за відомих умов.

7.5. Висновок

Із синергетичного погляду один з основних підходів до розв'язання глобальних проблем сучасності — це зміна імперативу, не політика силового тиску й “викручування рук”, а пошук способів коеволуції складних соціальних і геополітичних систем. Здійснення політики силовими методами надто небезпечно в сучасному складному світі, що нелінійно розвивається, де навіть випадкові збої в розгалужених інформаційних комп'ютерних мережах можуть призвести до світової катастрофи. Чим складніше організована система й чим більше різноманітних функцій вона виконує, тим вона нестійкіша у своєму функціонуванні та розвитку. Тому розуміння форм спільного життя різнорідних, розміщених на різних рівнях розвитку соціальних і геополітичних структур, напрямів їх стійкого коеволуційного розвитку стає конструктивною альтернативою сьогодення.

Синергетика — це оптимістична спроба оволодіти нелінійною ситуацією та застосувати методи ефективного нелінійного управління складними системами, які перебувають у стані нестійкості. Це спосіб досягнення бажаного й водночас здійсненого, узгодженого з властивостями складних систем. За словами футуриста Каролін Сміт, світ належить тим, хто дає йому найбільшу надію.

Запитання та завдання до розділу 7

1. Що таке синергетика?
2. Розвиток яких систем досліджує синергетика?
3. Що таке точка біфуркації?
4. Що таке динамічний хаос?
5. У чому полягає генезис методології синергетики?
6. Яку роль відіграє хаос у процесі саморозвитку систем?
7. Сформулюйте сім основних принципів синергетики.
8. Які умови саморозвитку систем ви знаєте?
9. Що таке структури-атрактори? Яку роль вони відіграють у процесі саморозвитку систем?
10. Чому синергетику іноді називають не наукою, а парадигмою?

Заключне слово

Якщо спробувати охарактеризувати сучасний системний аналіз іще раз, дуже укрупнено та трохи в іншому ракурсі, то можна сказати, що він включає такі види діяльності:

- *наукове дослідження* (теоретичне й експериментальне) питань, пов'язаних із проблемою;
- *проекування* нових систем і змін у наявних системах;
- *упровадження в практику* результатів, отриманих у ході аналізу.

Уже сам цей перелік, мабуть, позбавляє сенсу дискусію про те, чого в системному дослідженні більше — теорії чи практики, науки чи мистецтва, творчості чи ремесла, евристики чи алгоритмічності, філософії чи математики — усе це в ньому є. Звичайно, у конкретному дослідженні співвідношення між цими компонентами можуть бути різними. Системний аналітик готовий залучити до розв'язання проблеми будь-які потрібні для цього знання та методи — навіть ті, котрими він сам особисто не володіє; у цьому разі він не виконавець, а організатор дослідження, носій мети та методології всього дослідження.

Життя різноманітне, і для дослідження пропонованих проблем не завжди потрібно використовувати всі методи системного аналізу. Із трьох типів систем (технічних, природних і соціотехнічних) найважче аналізувати останні через різку перевагу в них суб'єктивного над об'єктивним, евристичного над формальним, знакових відношень над фізичними взаємодіями. Однак іще важливіша відмінність соціосистем — особливе значення часового фактора: ці системи

змінюються в ході дослідження як самі по собі, так і під впливом аналізу. Тільки діалектичний підхід, який лежить в основі системного аналізу, допомагає створити динамічну модель поточних подій і за її допомогою спланувати й організувати дії всіх учасників аналізу. Не слід звинувачувати в ненауковості сам системний аналіз, якщо в житті трапляється (а для соціосистем — нерідко!), що вже збирання й обробка інформації цілком задовольняють замовника чи грубі, але швидкі дослідження влаштовують його більше, ніж глибокі, докладні та тривалі.

Ще раз зупинімося на проблемі алгоритмізації системного аналізу. Будь-який процес дослідження, проектування та цільового впливу алгоритмічний: алгоритм — план цього процесу. Складання такого плану — прерогатива системного аналітика. Для такої проблеми може знадобитись особливий, спеціально пристосований для неї алгоритм аналізу. Повертаючись до аналогії з програмуванням на ЕОМ, можна сказати, що подібно тому, як програму складають з операторів мови стосовно розв'язуваної задачі, операції системного аналізу реалізують у послідовності, зручній для аналітика, стосовно даної конкретної ситуації. Чим вища кваліфікація аналітика, тим різноманітніші проведені ним дослідження.

Незважаючи на те, що немає універсального алгоритму, студенти й аналітики, які починають практику, мають потребу в конкретніших рекомендаціях, у типових схемах, які надалі можна варіювати. Як рекомендації дамо блок-схему неформальних етапів першої стадії системного аналізу (рис. 22). На схемі суцільними жирними стрілками зображено опорну послідовність дій, пунктирні стрілки позначають можливість повернення до вже пройдених дій, якщо це потрібно. Нижній вихід веде до формалізованих етапів аналізу.

Підбиваючи остаточний підсумок, ще раз спробуємо означити системний аналіз у його сучасному розумінні. Не можна сказати, що прикладний системний аналіз у теперішньому стані цілком відповідає цьому означенню. Скоріше, воно відбиває напрям розвитку прикладного системного аналізу, здійснюваний в останні роки.

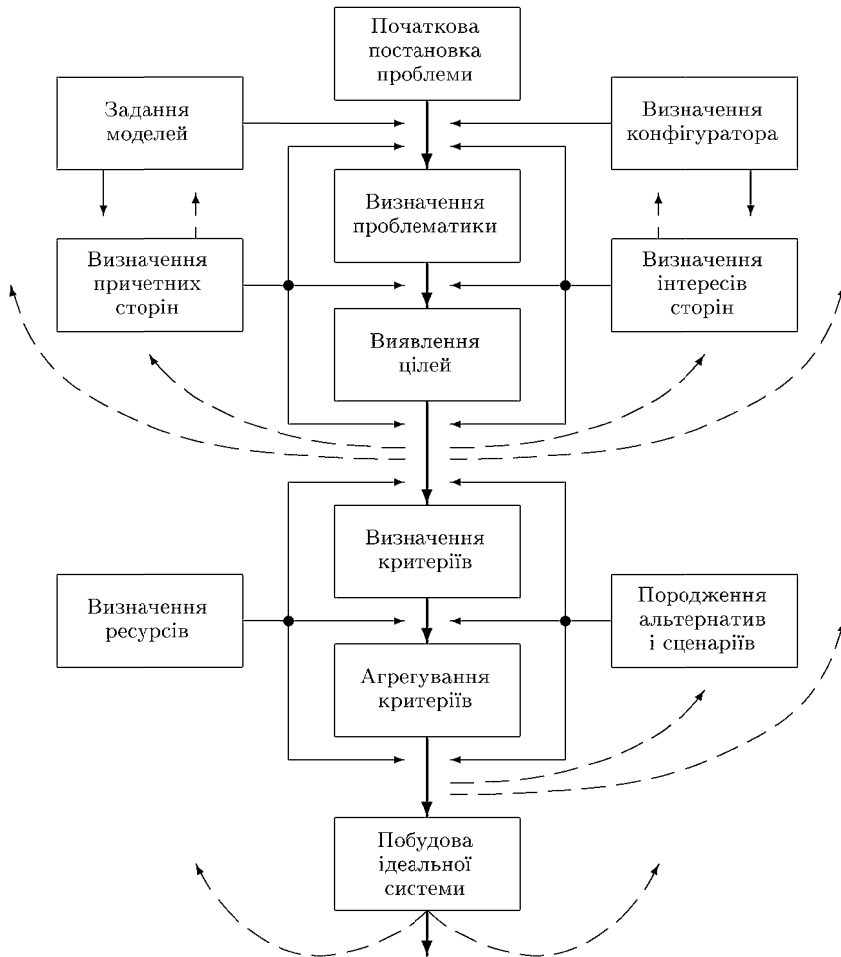


Рис. 22. Опорна схема алгоритму постановки задач прикладного системного дослідження реальної проблеми

Отже, із практичного погляду системний аналіз — це система методів дослідження чи проектування систем, пошуку планування та реалізації змін, призначених для ліквідації проблем; із методологічного — прикладна діалектика; із методичного — вирізняється міждисциплінарним і наддисциплінарним характером і втягненням у роботу як неформальних, евристичних, експертних методів, а також у разі можливості та потреби — строгих формальних математичних методів.

Список використаної та рекомендованої літератури

1. *Аверьянов А. Н.* Системное познание мира. — М.: Политиздат, 1985.
2. *Альтшуллер Г. С.* Найти идею. — Новосибирск: Наука, 1986.
3. *Арнольд В. И.* Теория катастроф. — М.: Наука, 1990.
4. *Аршинов В. И.* Синергетика как феномен постнеклассической науки. — М.: ИФ РАН, 1999.
5. *Беллман Р., Задэ Л.* Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976. — С. 172–215.
6. *Беляев А. А., Коротков Э. М.* Системология. — М.: ИНФРА-М, 2000.
7. *Бендарт Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. — М.: Мир, 1974.
8. *Берже П., Помо И., Видаль К.* Порядок в хаосе. — М.: Мир, 1991.
9. *Бир С.* Кибернетика и управление производством. — М.: Наука, 1965.
10. *Бир С.* Мозг фирмы. — М.: Радио и связь, 1993.
11. *Бирюков В. В., Геллер Е. С.* Кибернетика в гуманитарных науках. — М.: Наука, 1973.

Список використаної та рекомендованої літератури

12. *Блекуэлл Д., Гиришик М. А.* Теория игр и статистических решений. — М.: ИЛ, 1958.
13. *Богданов А. А.* Тектология: Всеобщая организационная наука: В 2 т. — М.: Экономика, 1989.
14. *Боно Э.* Латеральное мышление. — СПб.: Питер Паблишинг, 1997.
15. *Борисов А. Н., Левченко А. С.* Методы интерактивной оценки решений. — Рига: Зинанте, 1982.
16. *Бранский В. П.* Искусство и философия. — Калининград: Янтарный сказ, 1999.
17. *Бранский В. П.* Теоретические основания социальной синергетики // Петербургская социология. — 1997. — № 1. — С. 148–179.
18. *Бриллоэн Л.* Научная неопределенность и информация. — М.: Сов. радио, 1970.
19. *Буш Г. Я.* Основы эвристики для изобретателя. — Рига: Зинанте, 1977. — Ч. 1, 2.
20. *Васильева Н. И.* Циклы и ритмы в природе и обществе: моделирование природных периодических процессов. — Таганрог: Изд-во ТРГУ, 1995.
21. *Василькова В. В.* Порядок и хаос в развитии социальных систем (синергетика и теория социальной самоорганизации). — СПб.: Лань, 1999.
22. *Ватель И. А., Ерешико Ф. И.* Математика конфликта и сотрудничества. — М.: Знание, 1973.
23. *Вико Дж.* Основания новой науки об общей природе наций. — М.: ИСА; К.: Port-Royal, 1994.
24. *Вильчек Вс.* Алгоритмы истории. — М.: Прогресс, 1989.
25. *Винер Н.* Кибернетика. — М.: Сов. радио, 1968.
26. *Волновые процессы в общественном развитии.* — Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992.

Список використаної та рекомендованої літератури

27. *Вопросы* анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976.
28. *Гаек Я., Шидак З.* Теория ранговых критериев. — М.: Наука, 1971.
29. *Голицын Г. А.* Информация и творчество: На пути к интегральной культуре. — М.: Русский мир, 1997.
30. *Голицын Г. А., Петров В. М.* Информация — поведение — творчество. — М.: Наука, 1991.
31. *Гуд Г. Х., Макол Р. Э.* Системотехника. Введение в проектирование больших систем. — М.: Сов. радио, 1962.
32. *Джонс Дж. К.* Методы проектирования. — М.: Мир, 1986.
33. *Дмитриев Ю. Г., Устинов Ю. К.* Статистическое оценивание распределений вероятностей с учетом дополнительной информации. — Томск: ТГУ, 1988.
34. *Дружинин В. В., Конторов Д. С.* Системотехника. — М.: Радио и связь, 1985.
35. *Дюркгейм Э.* О разделении общественного труда. Метод социологии. — М.: Наука, 1991.
36. *Евин И. А.* Синергетика искусства. — М.: Лада, 1993.
37. *Ефимов А. Н.* Информационный взрыв: проблемы реальные и мнимые. — М.: Наука, 1985.
38. *Ефимов А. Н.* Элитные группы, их возникновение и эволюция // Знание — сила. — 1988. — № 1. — С. 56–64.
39. *Ефимов А. Н., Кутеев В. М.* Исследование и моделирование некоторых свойств элитных групп // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. — 1980. — № 3. — С. 177–185.
40. *Ефимов А. Н., Кутеев В. М.* Ранговые процедуры управления эволюцией элитных групп // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. — 1980. — № 6. — С. 3–12.
41. *Загоруйко Н. Г., Елжина В. Н., Лбов Г. С.* Алгоритмы обнаружения эмпирических закономерностей. — Новосибирск: Наука, 1985.

Список використаної та рекомендованої літератури

42. *Закревский А. Д.* Логика распознавания. — Минск: Наука и техника, 1988.
43. *Замогильный С. И.* Динамика социальной дифференциации. — Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1991.
44. *Иваницкий Г. Р.* Ритмы развивающихся сложных систем. — М.: Знание, 1988.
45. *Игнатъева А. В., Максимцов М. М.* Исследование систем управления: Учеб. пособие для вузов. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001.
46. *Ильин И. П.* Постмодернизм от истоков до конца столетия: эволюция научного мифа. — М.: Интрада, 1998.
47. *Информационная парадигма в науках о человеке.* — Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2000.
48. *Информация и самоорганизация.* — М.: РАГС, 1996.
49. *Информация и управление. Философско-методологические аспекты.* — М.: Наука, 1985.
50. *Калашиников В. В.* Сложные системы и методы их анализа. — М.: Знание, 1980.
51. *Калман Р., Фалб П., Арbib М.* Очерки по математической теории систем. — М.: Мир, 1971.
52. *Кальоти Дж.* От восприятия к мысли. О динамике неоднозначного и нарушениях симметрии в науке и искусстве. — М.: Мир, 1998.
53. *Капитонов Э. А.* Социология XX века. — Ростов н/Д: Феникс, 1996.
54. *Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г.* Синергетика и прогнозы будущего. — М.: Наука, 1997.
55. *Карташов В. А.* Система систем. Очерки общей теории и методологии. — М.: Прогресс-Академия, 1995.
56. *Квейд Э.* Анализ сложных систем. — М.: Сов. радио, 1969.

Список використаної та рекомендованої літератури

57. *Кемени Дж., Снелл Дж.* Кибернетическое моделирование. Некоторые приложения. — М.: Наука, 1983.
58. *Климонтович Н. Ю.* Без формул о синергетике. — Минск: Вышэйш. шк., 1986.
59. *Климонтович Ю. Л.* Нелинейная динамика открытых систем. — М.: Наука, 1995.
60. *Климонтович Ю. Л.* Турбулентное движение и структура хаоса. Новый подход к статистической теории открытых систем. — М.: Наука, 1990.
61. *Князева Е. Н., Курдюмов С. П.* Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — М.: Наука, 1994.
62. *Князева Е. Н., Курдюмов С. П.* Основания синергетики. Режимы с обострением, самоорганизация, темпомиры. — СПб.: Алетейя, 2002.
63. *Князева Е. Н.* Одиссея научного разума: Синергетическое видение научного прогресса. — М.: ИФ РАН, 1995.
64. *Коган И. М.* Прикладная теория информации. — М.: Радио и связь, 1981.
65. *Кокарева Т. А.* Системный анализ процедур принятия управленческих решений. — М.: Изд-во лесной промышленности, 1991.
66. *Концепция* самоорганизации в исторической ретроспективе. — М.: Наука, 1994.
67. *Костюк В. Н.* Изменяющиеся системы. — М.: Изд-во ВНИИ системных исследований РАН, 1993.
68. *Крылов В. Ю., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г.* Психология и синергетика. — М.: ИПМ, 1990.
69. *Кузьмин С. А.* Социальные системы: опыт структурного анализа. — М.: Наука, 1996.
70. *Курдюмов С. П.* Законы эволюции и самоорганизации в сложных системах. — М.: ИПМ, 1990.

71. Курдюмов С. П., Князева Е. Н. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — М.: Атомиздат, 1981.
72. Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Синергетика — новые направления. — М.: Знание, 1989.
73. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. — М.: Логос, 2000.
74. Лбов Г. С. Методы обработки разнотипных экспериментальных данных. — Новосибирск: Наука, 1981.
75. Лебон Г. Психология народов и масс. — СПб.: Макет, 1995.
76. Леман Э. Проверка статистических гипотез. — М.: Наука, 1964.
77. Леонтьев В. В. Экономическое эссе. Теории, исследования, факты и политика. — М.: Политиздат, 1990.
78. Лесечко М. Д. Основи системного підходу: теорія, методологія, практика: Навч. посіб. — Львів: ЛРІДУ УАДУ, 2002.
79. Лефевр В. Д. Конфликтующие структуры. — М.: Сов. радио, 1973.
80. Литвак Б. Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. — М.: Радио и связь, 1982.
81. Лоскутов А. Ю., Михайлов А. С. Введение в синергетику. — М.: Наука, 1990.
82. Лотман Ю. М. Культура и взрыв. — М.: Гнозис; Изд. группа “Прогресс”, 1992.
83. Лэсдон Л. С. Оптимизация больших систем. — М.: Наука, 1975.
84. Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Современные проблемы нелинейной динамики. — М.: Эдиториал УРСС, 2000.
85. Малинецкий Г. Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. Введение в нелинейную динамику. — М.: Эдиториал УРСС, 2000.
86. Мамчур Е. А., Обвинников Н. Ф., Уемов А. И. Принцип простоты и меры сложности. — М.: Наука, 1989.

Список використаної та рекомендованої літератури

87. *Маслов С. Ю.* Теория дедуктивных систем и ее применения. — М.: Радио и связь, 1986.
88. *Меерович Г. А.* Эффект больших систем. — М.: Знание, 1985.
89. *Меньшиков С. М., Клименко Л. А.* Длинные волны в экономике. Когда общество меняет кожу. — М.: Международные отношения, 1989.
90. *Меркулов И. П.* Когнитивная эволюция. — М.: Российская политическая энциклопедия (РОССПЭН), 1999.
91. *Месарович М., Мако Д., Такагара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. — М.: Мир, 1973.
92. *Миркин Б. Г.* Проблема группового выбора. — М.: Наука, 1974.
93. *Молодцов Д. А.* Устойчивость принципов оптимизации. — М.: Наука, 1987.
94. *Мороз А. И.* Курс теории систем. — М.: Высш. шк., 1987.
95. *Моррисей Дж.* Целевое управление организаций. — М.: Сов. радио, 1979.
96. *Мулен Э.* Теория игр с примерами из математической экономики: Пер. с фр. — М.: Мир, 1985.
97. *Мун Ф.* Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров. — М.: Мир, 1990.
98. *Назаретян А. П.* Агрессия, мораль и кризисы в развитии мировой культуры (синергетика социального процесса): Курс лекций. — М.: Наследие, 1995.
99. *Нестационарные структуры и диффузный хаос / Т. С. Ахромеева, С. П. Курдюмов, Г. Г. Малинецкий, А. А. Самарский.* — М.: Наука, 1992.
100. *Неуймин Я. Г.* Модели в науке и технике. — Л.: Наука, 1984.
101. *Нечипоренко В. И.* Структурный анализ систем. — М.: Сов. радио, 1977.
102. *Нижник Н. Р., Машков О. А.* Системний підхід в організації державного управління: Навч. посіб. / За заг. ред. Н. Р. Нижник. — К.: Вид-во УАДУ, 1998.

Список використаної та рекомендованої літератури

103. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного: Введение. — М.: Мир, 1990.
104. *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. — М.: Мир, 1979.
105. *Новая технология и организационные структуры.* — М.: Экономика, 1990.
106. *Одрин М. В., Картавов С. С.* Морфологический анализ систем. — К.: Наук. думка, 1977.
107. *Онтология и эпистемология синергетики.* — М.: ИФ РАН, 1997.
108. *Оптнер С. Л.* Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. — М.: Сов. радио, 1969.
109. *Орлов А. И.* Задачи оптимизации и нечеткие переменные. — М.: Знание, 1980.
110. *Орловский С. А.* Проблемы принятия решений при расплывчатой информации. — М.: Наука, 1981.
111. *Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П.* Введение в системный анализ: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 1989.
112. *Питерс Т., Уотермен Р.* В поисках эффективного управления. Опыт лучших компаний. — М.: Прогресс, 1986.
113. *Плотинский Ю. М.* Математическое моделирование динамики социальных процессов: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГУ, 1992.
114. *Плотинский Ю. М.* Теоретические и эмпирические модели социальных процессов: Учеб. пособие для вузов. — М.: Изд. корпорация “Логос”, 1998.
115. *Плюснин Ю. М.* Проблема биосоциальной эволюции: Теоретико-методологический анализ. — Новосибирск: Наука, 1990.
116. *Поппер К.* Відкрите суспільство та його вороги: У 2 т. — К.: Основи, 1994.
117. *Поспелов Д. А.* Логико-лингвистические модели в системах управления. — М.: Энергоиздат, 1981.

Список використаної та рекомендованої літератури

118. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление. Теория и практика. — М.: Наука, 1986.
119. *Пределы* предсказуемости. — М.: Центрком, 1997.
120. *Пригожин И.* От существующего к возникающему. Время и сложность в физических науках. — М.: Мир, 1985.
121. *Пригожин И.* От существующего к возникающему. — М.: Мир, 1984.
122. *Пригожин И., Стенгерс И.* Время, хаос, квант. — М.: Прогресс, 1994.
123. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. — М.: Прогресс, 1986.
124. *Принципы* организации социальных систем: Теория и практика / Под ред. М. И. Сетрова. — К., Одесса: Выща шк., 1988.
125. *Пфанцгль И.* Теория измерений. — М.: Мир, 1976.
126. *Райфа Г.* Анализ решений. Введение в проблемы выбора в условиях неопределенности. — М.: Наука, 1977.
127. *Растрингин Л. А.* Адаптация сложных систем. — Рига: Зинанте, 1981.
128. *Растрингин Л. А.* Кибернетика и познание. — Рига: Зинанте, 1978.
129. *Режимы* с обострением. Эволюция идеи. Законы коэволюции сложных структур. — М.: Наука, 1998.
130. *Самоорганизация* и наука: опыт философского осмысления. — М.: ИФ РАН; Арго, 1994.
131. *Самоорганизация:* кооперативные процессы в природе и обществе / Отв. ред Г. И. Рузавин. — М.: ИФ АН СССР, 1990.
132. *Синергетика* и социальное управление. — М.: РАГС, 1998.
133. *Синергетика-1:* Труды семинара по синергетике / Под ред. В. Г. Буданова, О. П. Иванова. — М.: Изд-во МГУ, 1998.
134. *Синергетика-2:* Труды семинара по синергетике / Под ред. В. Г. Буданова, О. П. Иванова. — М.: Изд-во МГУ, 1999.

Список використаної та рекомендованої літератури

135. *Синергетика-3*: Труды семинара по синергетике / Под ред. В. Г. Буданова, О. П. Иванова. — М.: Изд-во МГУ, 2000.
136. *Синергетика-4*: Труды семинара по синергетике / Под ред. В. Г. Буданова, О. П. Иванова. — М.: Изд-во МГУ, 2001.
137. *Синергетике 30 лет*. Интервью с профессором Г. Хакеном. Проведено Е. Н. Князевой // Вопросы философии. — 2000. — № 3. — С. 53–61.
138. *Синергетическая парадигма*. Многообразие поисков и подходов. — М.: Прогресс-Традиция, 2000.
139. *Синергетическая парадигма*. Нелинейное мышление в науке и искусстве. — М.: Прогресс-Традиция, 2002.
140. *Событие и смысл*. Синергетический опыт языка / Под ред. Л. П. Киященко, П. Д. Тищенко. — М.: ИФ РАН, 1999.
141. *Спицнадель В. Н.* Основы системного анализа: Учеб. пособие. — СПб.: Изд. дом “Бизнес-пресса”, 2000.
142. *Сурмин Ю. П.* Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. — К.: МАУП, 2003.
143. *Сурмін Ю. П.* Аналітична діяльність: Посіб. для аналітика неприбуткової організації. — К.: Центр інновацій і розвитку, 2002.
144. *Тельц Д., Эндриос Ф.* Ученые в организациях. Об оптимальных условиях для исследований и разработок. — М.: Прогресс, 1973.
145. *Теория выбора и принятия решений*: Учеб. пособие для студ. вузов / И. М. Макаров, Т. М. Виноградская, А. А. Рубчинский, В. П. Соколов. — М.: Наука, 1987.
146. *Тьюки Дж.* Анализ результатов наблюдений. — М.: Мир, 1981.
147. *Тюрин Ю. Н.* Статистические методы анализа экспертных оценок. — М.: Наука, 1977.
148. *Уемов А. И.* Системный подход и общая теория систем. — М.: Мысль, 1978.
149. *Уотерман Р.* Фактор обновления. Как сохраняют конкурентно-способность лучшие компании. — М.: Прогресс, 1988.

Список використаної та рекомендованої літератури

150. *Управление риском. Риск, устойчивое развитие, синергетика* / В. А. Владимиров, Ю. Л. Воробьев, Г. Г. Малинецкий и др. — М.: Наука, 2000.
151. *Урсул А. Д.* Информация. — М.: Наука, 1971.
152. *Фейнберг Е. Л.* Кибернетика, логика, искусство. — М.: Радио и связь, 1981.
153. *Финк Л. М.* Сигналы. Помехи. Ошибки... — М.: Радио и связь, 1984.
154. *Фишберн П.* Теория полезности для принятия решений. — М.: Наука, 1978.
155. *Форрестер Дж. Б.* Антиинтуитивное поведение сложных систем // Современные проблемы кибернетики. — М.: Знание, 1977. — Вып. 7. — С. 9–25.
156. *Френкс Л.* Теория сигналов. — М.: Сов. радио, 1974.
157. *Хагер Н.* Этапы формирования моделей // Эксперимент. Модель. Теория. — М.; Берлин: Наука, 1982.
158. *Хакен Г.* Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. — М.: Мир, 1985.
159. *Хакен Г.* Синергетика. — М.: Мир, 1981.
160. *Хиценко В. Е.* Самоорганизация в социальных системах. Эволюционный менеджмент: Реферативный обзор. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1993.
161. *Холл А.* Опыт методологии для системотехники. — М.: Сов. радио, 1975.
162. *Хьюбер П.* Робастность в статистике. — М.: Мир, 1984.
163. *Черкасов В. В.* Проблемы риска в управленческой деятельности. — М.: Рефл-бук; К.: Ваклер, 1999.
164. *Чернавский Д. С.* Синергетика и информация (динамическая теория информации). — М.: Едиториал УРСС, 2004.
165. *Черняк Ю. И.* Системный анализ в управлении экономикой. М.: Экономика, 1975.

Список використаної та рекомендованої літератури

166. *Черчмен У., Акофф Р., Арноф Л.* Введение в исследование операций. — М.: Наука, 1968.
167. *Шапиро Д. И.* Принятие решений в системах организационного управления: использование расплывчатых категорий. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
168. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем — искусство и наука. — М.: Мир, 1978.
169. *Шнейдер Ю. А., Шаров А. А.* Системы и модели. — М.: Радио и связь, 1982.
170. *Штофф В. А.* Моделирование и философия. — М.; Л.: Наука, 1966.
171. *Щербаков А. С.* Самоорганизация материи в неживой природе. Философские аспекты синергетики. — М.: Изд-во МГУ, 1990.
172. *Элти Дж., Кумбс М.* Экспертные системы: концепции и примеры. — М.: Финансы и статистика, 1987.
173. *Яковенко Е. Г., Басс М. И., Махров Н. В.* Циклы жизни экономических процессов, объектов и систем. — М.: ЦЭМИ АН СССР, 1991.
174. *Яковец Ю. В.* Предвидение будущего: парадигма цикличности. — М., 1992.
175. *Янг С.* Системное управление организацией. — М.: Сов. радио, 1972.
176. *Ackoff R. L.* Theory of practice in the social systems sciences // Paper to an International Roundtable, IIASA. — Laxenburg (Austria). — 6–8 Nov., 1986. — P. 14–33.
177. *Checkland P.* Rethinking a system approach // Rethinking the Process of Operation Research and System Analysis / Ed. by R. Tomlison, I. Kiss. — New York: Pergamon Press, 1984. — P. 43–66.
178. *Cotgrove S.* Catastrophe or Cornucopia: the Environment, Politics and the Future. — Chisester: Wiley, 1982.

Список використаної та рекомендованої літератури

179. *Dror Y.* Design for Policy Sciences. — New York: American Elsevier, 1971.
180. *Eddington A.* The Nature of the Physical World. — Ann-Arbor: Univ. of Mich. Press, 1958.
181. *Gharajedaghi J., Ackoff R. L.* Toward systemic education of system scientists // Systems Research. — 1985. — Vol. 2. — № 1. — P. 21–25.
182. *Hatry H. P.* Measuring the effectiveness of nondefence public programs // Operations Research. — 1970. — Vol. 18. — № 5. — P. 774.
183. *Mitroff I. I.* Why our pictures of the world do not work anymore // Doing Research that is Useful for Theory and Practice / Ed. by Lawler et al. — San Francisco: Tossey — Boss, 1985.
184. *Rivett P.* Perfection of means confusion of goals // Paper to an International Roundtable, IIASA. — Laxenburg (Austria). — 6–8 Nov., 1986. — P. 56–71.

Предметний покажчик

А

- Автомат 16
- Автоматизація 16
- Агрегат 149
- Агрегат-оператор 154
- Агрегат-структура 158
- Агрегування 137
- Адаптація структурна 22
- Аксиома
 - відкидання 83
 - згоди 83
 - монотонності 85
 - мультиплікаторності 85
 - переваги 83
 - Плотта 83
 - спадкування 82
 - сумарності 85
- Аксиоми
 - адитивності 47
 - тотожності 39
 - упорядкованості 41
- Алгебрична сума розпливчастих множин 53
- Алгебричний добуток розпливчастих множин 53
- Амплітуда 31

- Аналіз морфологічний 185
- Ансамбль функцій 29
- Антисиметричність 41
- Асиметрія 109
- Атрактор
 - дивний 211, 216
 - хаотичний 216

Б

- Байесів ризик 100
- Байесова процедура 101
- Біт 36

В

- Вибір 68
 - груповий 85
 - погоджений 90
 - у разі невизначеності 93
- Вимірювання 38
 - непряме 58
- Випадковий процес 30
 - дискретний 30
 - за інформативним параметром 30
 - у часі 30
 - ергодичний 30
 - неергодичний 30
 - неперервний 30

- за інформативним параметром 30
- у часі 30
- нестационарний 30
- стационарний 30
- у вузькому розумінні 30
- у широкому розумінні 30
- Вихід системи 10
- Відношення 12
 - бінарне 77
 - антирефлексивне 79
 - антисиметричне 79
 - асиметричне 79
 - повне 77
 - рефлексивне 78
 - симетричне 79
 - транзитивне 79
 - — негативно 79
 - — сильно 79
 - універсальне 77
 - домінування 79
 - еквівалентності 79
 - непряме 8
 - порядку
 - нестроого 79
 - сильного розмите 109
 - слабого розмите 109
 - строгого 79
 - правдоподібності 102
 - пряме 8
 - розмите
 - сильного порядку 109
 - слабого порядку 109
 - розпливчасте 53
- Відстань між ранжуваннями 120
- Включення розпливчастої множини 52
- Вхід системи 10
- Г**
- Гомеостаз 210
- Гра
 - ділова 187
 - з нульовою сумою 94
- Д**
- Декомпозиція 137
- Демодуляція 31
- Дивний атрактор 211, 216
- Динамічний хаос 211
- Дисипація 213
- Ділова гра 187
- Доповнення до розпливчастої множини 52
- Е**
- Еквівалентності
 - відношення 79
 - клас 40, 79
- Експеримент
 - активний 37
 - керований 37
 - пасивний 37
- Експериментальна таблиця 56
- Елементарний результат 144
- Елемент системи 11
- Емерджентність 149
- Ентропія 33
 - апостеріорна 34
 - апріорна 34

- умовна 33
- Ергодичність 30
- Ергономіка 16
- З**
- Зв'язка 43
- Зв'язність 109
- Зменшення розмірності моделі 57
- Змінна
 - детермінована 18
 - дискретна 17
 - лінгвістична 51
 - неперервна 18
 - розмита 19
 - стохастична 18
- Значення середнє 120
- І**
- Ідеаліст 66
- Ієрархія систем 25
- Інтроспекція 64
- К**
- Керування без зворотного зв'язку 22
- Кількість інформації 34
- Клас еквівалентності 40, 79
- Класифікація 57
 - систем 13
- Кластеризація 57
- Когерентність 217
- Код 28
- Коеволюція 217
- Коефіцієнт
 - конкордації
 - для нестроого ранжування 118
 - для строгого ранжування 118
 - узгодженості думок експертів 119
- Коливання-носії 31
- Компонент релевантний 143
- Компроміс 120
- Конструкція системи 12
- Конфігуратор 153
- Критеріальна мова 70
- Критерій 70
 - Гурвіца 96
 - максимінний 95
 - мінімаксний 95
 - мінімаксного жалю 95
 - переваги 69
 - песимізму-оптимізму 96
 - якості 70
- М**
- Мажоранта за відношенням 80
- Максимізація
 - критерію 70
 - умовна 72
- Матриця даних 56
- Медіана
 - Кемені — Снелла 120
 - Кука — Сейфорда 121
- Мережа семантична 158
- Мета 9, 74
 - об'єктивна 13
 - суб'єктивна 13
- Метод
 - “Дельфі” 122

- Кондорсе 118
максимальної правдопо-
дібності 101
мозкового штурму 182
парних порівнянь 119
поступок 73
фон Неймана — Морген-
штерна 121
- Механізм 16
- Мідранг 43
- Множина
нерозпливчаста 51
Парето 75
розпливчаста 51
— номінальна 52
— порожня 51
— розкладена 53
— субнормальна 52
R-оптимальних елементів
80
- Мова
бінарних відношень 75
критеріальна 70
функцій вибору 81
- Модель 6
абстрактна 8
актуалізована 22
декларативна 56
дескриптивна 56
динамічна 7, 12
кількісна 56
класифікаційна 56
конструктивна 56
матеріальна 8
пізнавальна 7
прагматична 7
- процедурна 56
системи
— динамічна 12
— статична 12
складу системи 11
статична 7
структурна 7
умовна 9
числова 56
якісна 56
- Моделювання 6
- Модуляція 31
амплітудна 31
фазова 31
частотна 31
- Мозковий штурм 182
- Морфологічний аналіз 185
- Н**
- Набір функцій 29
- Ніг 36
- Нормальна форма гри 94
- Носій розпливчастої множини
51
- О**
- Об'єднання розпливчастих
множин 52
- Означення системи
друге 12
перше 9
- Оператор
без зворотного зв'язку 19
безінерційний 19
без пам'яті 19
замкнений 19

- зі зворотним зв'язком 19
- із пам'яттю 19
- інерційний 19
- квазілінійний 20
- лінійний 20
- нелінійний 20
- розімкнений 19
- Опис змінних
 - змістовний 17
 - змішаний 17
 - формалізований 17
- Оптимальність за відношенням 80
- Організація 25
- Оцінка
 - Копленда 88
 - Сімпсона 88
- П**
- Парадокс
 - Ерроу 90
 - Кондорсе 87
- Перетин
 - відношення
 - верхній 78
 - нижній 78
 - розпливчастих множин 52
- Період
 - сигналу 31
 - шкали 48
- Підклас 13
- Підсистема 11
- Підстроювання параметрів 22
- Підхід системний 65
- Поліпшення системи 63
- Пошук екстремуму 58
- Правило
 - більшості 86
 - відносної 87
 - де Борда 87
 - “делегування” 130
 - загальне підрахунку балів 88
 - “збирання врожаю” 130
 - Кондорсе 87
 - Копленда 87
 - “претендент — рекомендувач” 129
 - “прополовання” 129
 - Сімпсона 88
- Проблематика 164
- Проблемна ситуація 9
- Прогнозування 58
- Проектування системи 65
- Простір фазовий 211
- Протокол спостережень 56
- Процедура байєсова 101
- Процес
 - випадковий 30
 - дискретний
 - за інформативним параметром 30
 - у часі 30
 - ергодичний 30
 - неергодичний 30
 - неперервний
 - за інформативним параметром 30
 - у часі 30
 - нестационарний 30
 - стационарний

- у вузькому розумінні 30
 - у широкому розумінні 30
- Р**
- Ранг 43
 - Ранжування
 - вислідне 120
 - групове 120
 - колективне 120
 - Реалізація 30
 - Реаліст 66
 - Регулювання 22
 - Результат елементарний 144
 - Релевантний компонент 143
 - Ризик байесів 100
 - Рівень домагань 74
 - Рівність розпливчастих множин 52
 - Робот 16
 - Розвиток системи 12
 - Розпливчасте відношення 53
 - Розпливчастих множин
 - алгебрична сума 53
 - алгебричний добуток 53
 - об'єднання 52
 - перетин 52
 - рівність 52
 - теорія 51
 - Розпливчастої множини
 - включення 52
 - носій 51
 - Розробка сценаріїв 185
- С**
- Семантична мережа 158
 - Середнє значення 120
 - Сигнал 28
 - гармонічний 31
 - динамічний 29
 - з обмеженою енергією 31
 - з обмеженою смугою частот 32
 - імпульсний 32
 - модульований 31
 - обмеженої тривалості 32
 - періодичний 31
 - статичний 29
 - Символ Кронекера 41
 - Синектика 183
 - Синергетика 206
 - Система 9, 12
 - біотехнічна 17
 - велика 24
 - динамічна 12
 - екологічна 17
 - зі змінними
 - — кількісними 17
 - — якісними 17
 - з описом змінних
 - — — змістовним 17
 - — — змішаним 17
 - — — формалізованим 17
 - керована 13
 - керувальна 14
 - непараметризована 19
 - організаційна 17
 - параметризована 19
 - природна 13, 15
 - проблемомістка 164
 - складна 24
 - штучна 13, 15

- Системи
 вихід 10
 вхід 10
 елемент 11
 конструкція 12
 модель
 — динамічна 12
 — статична 12
 означення
 — друге 12
 — перше 9
 поліпшення 63
 проектування 65
 розвиток 12
 структура 12
 структурна схема 12
 функціонування 12
- Системний підхід 65
- Ситуація проблемна 9
- Спектр 32
- Спостереження 37
- Стан стійкий 29
- Статистика 157
 байєсова 100
 достатня 157
 непараметрична 102
 оптимальна 157
 робастна 104
- Стійкий стан 29
- Стратегія
 змішана 96
 чиста 96
- Строге суперництво 94
- Структура-атрактор 216
- Структура системи 12
- Структурна адаптація 22
- Структурна схема системи 12
- Ступінь узгодженості думок експертів 116
- Суперкритерій 71
- Суперництво строге 94
- Схема структурна системи 12
- Сценарій 185
- Т**
- Таблиця експериментальна 56
- Теорема
 про неможливість 90
 Фішберна 89
 фон Неймана 97
- Теорія
 катастроф 209
 моделей 6
 розпливчастих множин 51
- Точка
 біфуркації 209
 ідеальна 74
 опорна 74
 сідлова 96
- Транзитивність 41, 109
- Тривалість сигналу 32
- У**
- Умова
 асиметрії розмита 109
 зв'язності розмита 109
 монотонності 90
 незалежності
 — від відкинутих альтернатив 83
 — від шляху 83
 незв'язаних альтернатив 90

- розмита
 - асиметрії 109
 - зв'язності 109
 - транзитивності 109
- суверенності 90
- того, що немає диктаторства 90
- транзитивності розмита 109
- Умовна максимізація 72
- Упорядкування об'єктів 57
- Ухвалення рішення 69
- Ф**
- Фаза 31
- Фазовий простір 211
- Фактор системотвірний 151
- Флуктуація 210
- Форма імпульсу 32
- Фрейм 140
- Функцій
 - ансамбль 29
 - набір 29
- Функціонування системи 12
- Функція
 - квазісуматорна 83
 - корисності 70, 80
 - належності 51
 - переваги 70
 - правдоподібності 101
 - цільова 70
- Х**
- Хаос динамічний 211
- Ч**
- Частота 31
- колова 31
- Ш**
- Шкала
 - абсолютна 48
 - бальна оцінки знань учнів 44
 - відношень 47
 - інтервалів 46
 - класифікаційна 40
 - магнітуд землетрусів за Ріхтером 44
 - найменувань 40
 - номінальна 40
 - періодична 48
 - порядкова 41
 - Черчмена й Акоффа 45
 - порядку
 - простого 41
 - слабкого 42
 - часткового 42
 - рангова 41
 - різниць 48
 - сили вітру за Ботфортом 44
 - твердості за Моосом 44
 - циклічна 48
- Шум 28
 - адитивний 59
- Я**
- “Ящик”
 - “білий” 12
 - “прозорий” 12
 - “чорний” 10

Н

HS-режим 218

Л

LS-режим із заостренням 218

Перелік таблиць

Таблиця 1. Модель складу родини	11
Таблиця 2. Вимірювальні шкали	50
Таблиця 3. Профіль переваг для голосування 21 виборця за чотири альтернативи	88
Таблиця 4. Співвідношення між двома типами знань	162
Таблиця 5. Протилежність технократичного та гуманістичного мислення	170
Таблиця 6. Приклад розробки системи телевізійного зв'язку .	186

Перелік ілюстрацій

Рис. 1. Модель “чорного ящика”	10
Рис. 2. Схема функціонування керованої системи	14
Рис. 3. Класифікація систем за їх походженням	15
Рис. 4. Класифікація систем за описом змінних	18
Рис. 5. Класифікація систем за типом їх операторів	20
Рис. 6. Класифікація систем за способом керування	21
Рис. 7. Класифікація систем за ступенем ресурсної забезпеченості керування	23
Рис. 8. Ієрархія моделей, використовувана в процесі вимірювання	61
Рис. 9. Класифікація задач вибору та способів їх розв’язання в разі їх опису критеріальною мовою	76
Рис. 10. Способи задання вибору мовою бінарних відношень ..	77
Рис. 11. Приклад графа переваг	80
Рис. 12. Ілюстрація аксіом — обмежень на функції вибору	84
Рис. 13. Ілюстрація парадокса багатоступінчастого голосування за наявності коаліції	92
Рис. 14. Загальна схема прийняття статистичних рішень	99
Рис. 15. Взаємозв’язок задач вибору	132

Перелік ілюстрацій

Рис. 16. Загальна схема діяльності	141
Рис. 17. Схема компонентів навчального процесу	142
Рис. 18. Схема компромісів між принципами простоти та повноти аналізу	143
Рис. 19. Укрупнена блок-схема алгоритму декомпозиції	147
Рис. 20. Розгорнена блок-схема алгоритму декомпозиції	150
Рис. 21. Схема входів організаційної системи	166
Рис. 22. Опорна схема алгоритму постановки задач прикладного системного дослідження реальної проблеми .	222

Зміст

Переднє слово	3
-------------------------	---

Частина I. Теорія систем

Розділ 1. МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ	5
1.1. Класифікація моделей	7
1.1.1. Пізнавальні та прагматичні моделі	7
1.1.2. Статичні та динамічні моделі	7
1.2. Способи втілення моделей	8
1.2.1. Абстрактні моделі та роль мов	8
1.2.2. Матеріальні моделі та види подібності	8
1.3. Моделі систем	9
1.3.1. Проблеми та системи	9
1.3.2. Модель “чорного ящика”	10
1.3.3. Модель складу системи	11
1.3.4. Модель структури системи	12
1.3.5. Динамічні моделі систем	12
1.4. Штучні та природні системи	12
1.5. Класифікації систем	13
1.5.1. Класифікація систем за їх походженням	15
1.5.2. Класифікація систем за описом змінних	17
1.5.3. Класифікація систем за типом їх операторів	19

1.5.4. Класифікація систем за способом керування . . .	21
1.5.5. Класифікація систем за ступенем ресурсної забезпеченості керування	22
1.6. Ієрархія систем	25
Запитання та завдання до розділу 1	26

Розділ 2. ІНФОРМАЦІЙНІ АСПЕКТИ ВИВЧЕННЯ СИСТЕМИ 28

2.1. Сигнали в системах	28
2.1.1. Типи сигналів	29
2.1.2. Випадковий процес — математична модель сигналів	29
2.1.3. Класи випадкових процесів	30
2.1.4. Математичні моделі реалізацій випадкових процесів	31
2.2. Ентропія	33
2.3. Кількість інформації	34
2.4. Одиниці виміру ентропії та кількості інформації	35
Запитання та завдання до розділу 2	36

Розділ 3. ВИМІРЮВАННЯ 37

3.1. Експеримент і модель	37
3.2. Вимірювальні шкали	38
3.2.1. Кількісне визначення та вимірювання	39
3.2.2. Шкали найменувань	40
3.2.3. Порядкові шкали	41
3.2.4. Модифіковані порядкові шкали	43
3.2.5. Шкали інтервалів	46
3.2.6. Шкали відношень	47
3.2.7. Шкали різниць	48
3.2.8. Абсолютна шкала	48
3.3. Розпливчастий опис ситуацій	49
3.4. Імовірнісний опис ситуацій. Статистичні вимірювання	54

3.5. Реєстрація експериментальних даних	56
3.5.1. Класифікаційні моделі	56
3.5.2. Числові моделі	58
3.5.3. Особливості протоколів спостережень	58
3.6. Вимірювання як ієрархія моделей	59
Запитання та завдання до розділу 3	60

Частина II. Системний аналіз

Розділ 4. ВИБІР (ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ) 63

4.1. Поліпшення та проектування систем	63
4.1.1. Поліпшення систем	63
4.1.2. Проектування систем. Системний підхід	65
4.1.3. Реаліст проти ідеаліста	66
4.2. Різноманіття задач вибору	68
4.2.1. Вибір як реалізація мети	68
4.2.2. Множинність задач вибору	69
4.3. Мови опису вибору	70
4.3.1. Критеріальна мова опису вибору	70
4.3.2. Опис вибору мовою бінарних відношень	75
4.3.3. Мова функцій вибору	81
4.4. Груповий вибір	85
4.4.1. Опис групового вибору	85
4.4.2. Правила голосування	86
4.4.3. Парадокси голосування	89
4.5. Вибір у разі невизначеності	93
4.5.1. Задання невизначеності за допомогою матриці	93
4.5.2. Критерії порівняння альтернатив у разі невизначеності наслідків	95
4.5.3. Загальне уявлення про теорію ігор	96
4.5.4. Вибір у разі статистичної невизначеності	97
4.5.5. Вибір у разі розпливчастої невизначеності	106
4.6. Переваги та недоліки ідеї оптимальності	109

4.6.1. Переваги оптимізаційного підходу	110
4.6.2. Обмеженість оптимізаційного підходу	111
4.6.3. Оптимізація та субоптимізація	113
4.7. Експертні методи вибору	114
4.7.1. Фактори, що впливають на роботу експерта	115
4.7.2. Методи обробки думок експертів	116
4.7.3. Метод “Дельфі”	122
4.8. Людино-машинні системи та вибір	123
4.9. Вибір і відбір	126
4.9.1. Повторний вибір	126
4.9.2. Основні ідеї теорії елітних груп	127
4.9.3. Процедура “претендент — рекомендувач”	129
4.9.4. Процедури “прополовання” та “збирання врожая”	129
4.9.5. Процедура “делегування”	130
Запитання та завдання до розділу 4	131

Розділ 5. ПРОЦЕДУРИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ 135

5.1. Аналіз і синтез у системних дослідженнях	135
5.1.1. Поєднання аналізу та синтезу в системному дослідженні	135
5.1.2. Особливості синтетичних методів	136
5.2. Моделі систем як основи декомпозиції	138
5.2.1. Змістовна модель як основа декомпозиції	138
5.2.2. Зв'язок між формальною та змістовною моделями	140
5.2.3. Проблема повноти моделей	140
5.3. Алгоритмізація процесу декомпозиції	142
5.3.1. Компроміси між повнотою та простотою	142
5.3.2. Типи складності	145
5.3.3. Алгоритм декомпозиції	147
5.4. Агрегування, емерджентність, внутрішня цілісність систем	149

5.4.1. Емерджентність як прояв внутрішньої цілісності системи	149
5.4.2. Емерджентність як результат агрегування	151
5.5. Види агрегування	152
5.5.1. Конфігуратор	152
5.5.2. Агрегати-оператори	154
5.5.3. Класифікація як агрегування	154
5.5.4. Функція декількох змінних як агрегат	155
5.5.5. Статистики як агрегати	157
5.5.6. Агрегати-структури	158
Запитання та завдання до розділу 5	160

Розділ 6. ПРО НЕФОРМАЛІЗОВАНІ ЕТАПИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ 161

6.1. Що таке системний аналіз	161
6.2. Формулювання проблеми	163
6.2.1. Перетворення проблеми в проблематику	164
6.2.2. Методи побудови проблематики	165
6.3. Виявлення цілей	167
6.3.1. Небезпека підміни цілей засобами	168
6.3.2. Вплив цінностей на цілі	169
6.3.3. Множинність цілей	170
6.3.4. Небезпека зміщування цілей	171
6.3.5. Змінення цілей згодом	172
6.4. Формування критеріїв	173
6.4.1. Критерії як моделі цілей	173
6.4.2. Причини багатокритеріальності реальних задач	174
6.4.3. Критерії й обмеження	176
6.5. Генерування альтернатив	179
6.5.1. Способи збільшення кількості альтернатив	179
6.5.2. Створення сприятливих умов	180
6.5.3. Способи зменшення кількості альтернатив	181
6.5.4. Мозковий штурм	182
6.5.5. Синектика	183

6.5.6. Розробка сценаріїв	184
6.5.7. Морфологічний аналіз	185
6.5.8. Ділові ігри	187
6.6. Алгоритми проведення системного аналізу	187
6.6.1. Труднощі алгоритмізації системного аналізу	188
6.6.2. Компоненти системних досліджень	190
6.7. Утілення в життя результатів системних досліджень	195
6.7.1. Упровадження результатів системного аналізу в практику	196
6.7.2. Потреба в методології впровадження	197
6.7.3. Зростання та розвиток	198
6.7.4. Умова добровільності участі в аналізі	199
6.7.5. Роль відносин між учасниками аналізу	200
6.7.6. Проблеми та способи їх розв'язання	201
6.7.7. Роль етики в системному аналізі	202
Запитання та завдання до розділу 6	204
Розділ 7. СИНЕРГЕТИКА	206
7.1. Синергетика як новий напрям наукових досліджень	206
7.2. Генезис методології синергетики	209
7.3. Принципи синергетики	213
7.4. Умови саморозвитку складних систем	214
7.5. Висновок	219
Запитання та завдання до розділу 7	219
Заключне слово	220
Список використаної та рекомендованої літератури	224
Предметний покажчик	237
Перелік таблиць	246
Перелік ілюстрацій	247

In this manual one can find relevant theoretical theses and the main trends of development of modern theory of system and systemic analysis. Great deal of attention has been paid to descriptive presentation of material. The manual contains main the analysis of the main principles of systemic analysis and the most broadly-used methods that have proven to be reliable in practice.

The manual is meant for students of non-mathematical specialties of the higher educational establishments involved in analytical activities and problems of decision taking.

Навчальне видання

Чорней Наталія Борисівна

Чорней Руслан Костянтинович

ТЕОРІЯ СИСТЕМ І СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ

Навчальний посібник

Scientific edition

Chorney, Natalia B.

Chorney, Ruslan K.

THEORY OF SYSTEM AND SYSTEMIC ANALYSIS

Scientific Manual

Відповідальний редактор *С. Г. Рогузько*

Редактор *С. Г. Атаєва*

Комп'ютерне верстання *А. В. Ясиновський*

Оформлення обкладинки *А. В. Шиков*

Підп. до друку 24.02.05. Формат 60×84/16. Папір офсетний. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 14,88. Обл.-вид. арк. 14,14. Тираж 5000 пр. Зам. № 5-371

Міжрегіональна Академія управління персоналом (МАУП)
03039 Київ-39, вул. Фрометівська, 2, МАУП

*Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи ДК № 8 від 23.02.2000*

Друкарня ТОВ "Техніка ЛТД"
03062 Київ-62, вул. Чистяківська, 32

Свідоцтво ДК № 54 від 17.04.2000