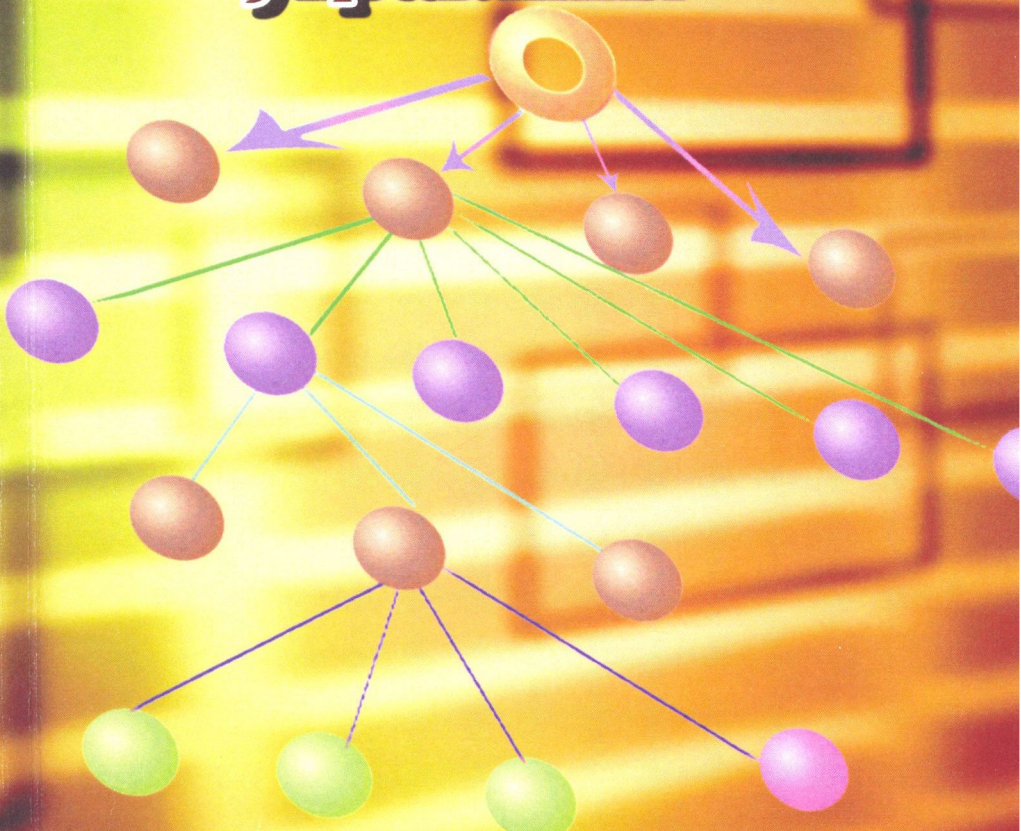


А.П. Ладанюк, Я.В. Смітюх, Л.О. Власенко,
Н.А. Заєць, І.В. Ельперін

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ складних систем управління



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

А.П. ЛАДАНЮК
Я.В. СМІТЮХ
Л.О. ВЛАСЕНКО
Н.А. ЗАЄЦЬ
І.В. ЕЛЬПЕРІН



СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки,
молоді та спорту України
як навчальний посібник для студентів
напряму «Автоматизація
та комп'ютерно-інтегровані технології»
вищих навчальних закладів*

Київ НУХТ 2013

УДК 004.451(075)

Гриф надано Міністерством освіти
і науки, молоді та спорту України
(лист №1/11-5119 від 23.06.2011 р.)

Присвячено 130-річчю
Національного університету
харчових технологій

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. **А.І. Жученко** (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»); д-р техн. наук, проф. **В.М. Казак** (Національний авіаційний університет); д-р техн. наук, проф. **Ю.О. Скрипник** (Київський Національний університет технологій та дизайну)

Системний аналіз складних систем управління: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, Я.В. Смітюх, Л.О. Власенко та ін. — К.: НУХТ, 2013. — 274 с.

ISBN 978-966-612-146-5

На основі єдиного системного підходу викладено методологію, методи та процедури аналізу і синтезу складних систем управління (керування). Розглянуто системні задачі структурного аналізу складних систем керування, методи математичного опису функціонування їх, проблеми прийняття рішень з використанням інтелектуальних методів та експертних оцінок. Наведено приклади сценарно-цільового аналізу на основі прографів та алгоритми координації з використанням апарату нечітких множин, системні задачі прийняття рішень в умовах невизначеності.

Для студентів напряму «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» вищих навчальних закладів. Може бути корисний для спеціалістів, які займаються проблемами створення та експлуатації систем керування.

УДК 004.451(075)

ISBN 978-966-612-146-5

© А.П. Ладанюк, Я.В. Смітюх,
Л.О. Власенко, Н.А. Заєць,
І.В. Ельперін, 2013
© НУХТ, 2013

ВСТУП

Розвиток наукових знань та їх застосування у різних галузях практичної діяльності людини в XVIII — XIX ст. сприяв значній диференціації наукових і прикладних напрямів, що привело до виникнення багатьох спеціальних дисциплін, які часто використовують подібні формальні методи. Водночас ці методи настільки змінювались залежно від пристосування їх до конкретних задач, що спеціалісти різних прикладних галузей перестали розуміти один одного.

Наприкінці XIX ст. значно зросла кількість комплексних проектів і проблем, які потребували участі спеціалістів різних сфер знань, зокрема це стосується управління економікою країни. Необхідність використання спеціалістів широкого профілю зумовлена їхнім вмінням узагальнювати дані та знання, використовувати аналогії, формувати комплексні моделі. Поняття систем набуло особливого значення, перетворилося на спеціальну загальнонаукову категорію, з'явилися узагальнювальні наукові напрями.

Підвищений інтерес до системних аналітиків, методів системного аналізу, системного підходу проявився насамперед як можливість постановки та розв'язання задач зі значними невизначеностями. Розвиток науки, розроблення та застосування складних технічних комплексів, ускладнення виробничих процесів зумовили постановку задач, які не розв'язуються традиційними математичними методами. Особливого значення набули евристичні методи, постановка та оброблення результатів експериментів, оцінювання адекватності складних моделей, процедури та методи прийняття рішень тощо.

У складних проблемах визначилась особлива роль людини як носія цілісного сприйняття, збереження цілісності при декомпозиції цих проблем, розподілу робіт, носія систем цінностей та

критеріїв прийняття рішень, з'явився термін «особа, яка приймає рішення» (ОПР). Для складних проблем почали створювати системи організації проектування, системи керування проектами, теорія систем набула самостійного значення.

Сучасний системний аналіз — прикладна наука, орієнтована на з'ясування причин реальних складностей, які виникають перед «власником проблеми» (як правило, це конкретна організація, установа, підприємство, колектив), та на формування варіантів запобігання їм.

Системний аналіз — сукупність методологічних засобів, які використовуються для підготовки та обґрунтування рішень зі складних проблем політичного, військового, соціального, економічного, технічного та наукового характеру. Основою є системний підхід та низка методів, математичних дисциплін і сучасної теорії керування. Основна процедура — побудова узагальненої моделі, яка відображає взаємозв'язки реальної ситуації, технічна основа — ЕОМ та інформаційні системи. Часом терміни «системний аналіз» та «системний підхід» вживають як синоніми.

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

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

Для цього слід сформувати нетрадиційні методи досліджень, уніфікації та узгодження інформації. Це, зокрема, комплексні, а краще — системні дослідження, які стали можливими і набули особливого розвитку в епоху ЕОМ. У нашому випадку термін «системний аналіз» означатиме сукупність методів, що ґрунтуються на використанні ЕОМ та орієнтовані на дослідження складних систем — технічних, економічних, екологічних та ін. Результатом системних досліджень має стати вибір цілком конкретної альтернативи: план розвитку, параметри конструкції, структура тощо.

Системний аналіз — дисципліна, яка вивчає проблеми прийняття рішень в умовах, коли вибір альтернативи потребує аналізу складної інформації різної фізичної природи.

Основне завдання дисципліни — показати, як різні знання (математика, теорія керування, методи оптимізації та ін.), начебто різні та на перший погляд мало пов'язані, можуть сприяти розв'язанню складних прикладних задач, а системний інтегратор стає однією з головних діючих осіб, архітектором, конструктором складних систем. Для конструювання та дослідження складних систем немає набору рецептів, є лише методологія, у будь-якому разі потрібні різностороння культура, винахідливість і талант.

Для розв'язування складних комплексних проблем методи системного аналізу застосовуються з урахуванням того, що в процесі прийняття рішень вибір слід робити в умовах невизначеності. Процес системного аналізу з кожної проблеми поділяють на чотири стадії:

- постановка проблеми, визначення мети та критеріїв оцінювання;
- структурний аналіз досліджуваної системи;
- розроблення концепції розвитку системи та підготовка можливих варіантів;
- безпосередній аналіз відібраних варіантів рішень та їхніх наслідків.

За допомогою основного інструментарію — ПЕОМ найбільш вдало поєднуються формальні й неформальні методи, експериментальні, евристичні та строго математичні основи.

Системність — не досягнення науки, не деяке нововведення, а загальна властивість матерії, форма її існування, тобто невід'ємна властивість практики, у тому числі мислення. Проте будь-яку діяльність певною мірою можна вважати системною. Так, поява проблеми — ознака недостатньої системності, розв'язання проблеми — результат підвищення системності.

Науково-технічний прогрес сприяв виникненню таких понять, як складні та великі системи, що мають специфічні властивості й характерні проблеми. Необхідність розв'язання складних проблем, подолання якісних та кількісних перешкод потребувала застосування великої кількості способів, методів, підходів, які згодом перетворилися на певну технологію, серед яких:

- методи проектування;
- методи інженерної творчості;
- системотехніка;
- дослідження операцій;
- системний підхід;

- політологія;
- футурологія;
- імітація моделювання;
- методологія експерименту.

Системність світу та людського пізнання й практики — об'єктивно існуюча дійсність, тому на загальнонауковому рівні розвиваються і такі сфери:

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

Об'єктивною реальністю були також великі та складні системи, що зумовило необхідність розроблення методів для їх створення й дослідження. Передбачалося виникнення прикладної науки, так званого «мосту» між абстрактними теоріями системності та новою системною практикою — системного аналізу — зі своїми об'єктами, арсеналом засобів та практичним досвідом.

Головна мета системного аналізу — усунення проблеми або, як мінімум, з'ясування її причин. Тому використовується широкий спектр засобів, можливості різних наук — математики, обчислювальної техніки, моделювання, експериментальних досліджень та ін.

Спеціаліст-системотехнік не може бути професіоналом у сфері кожної науки, проте він повинен розпізнавати та класифікувати конкретні проблеми, залучати інших фахівців для розв'язання складних задач, мати широку ерудицію, організовувати колективи.

Нині системні уявлення досягли такого рівня, що корисність та важливість системного підходу для розв'язання складних проблем стали звичними, загальноприйнятими та вийшли за межі спеціальних дисциплін. Більше того, відсутність системності часто призводить до прийняття неправильних рішень.

Як зазначалося, системність існує об'єктивно, але вона має різні рівні, тому розв'язання проблеми завжди означає перехід на новий, вищий рівень системності. Системність — це не стільки стан, скільки процес. Навіть тепер можна вважати, що ми підійшли до інтуїтивного розуміння понять «система»,

«системний аналіз» та ін. У процесі навчання системність завжди підвищується. Наведемо кілька найпоширеніших систем:

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

Усі ці поняття об'єднує насамперед системність.

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

- структурованість;
- взаємний зв'язок її складових;
- підпорядкованість організації всієї системи певній меті.

Цілеспрямована діяльність людини при розв'язуванні певних проблем пов'язана з алгоритмічністю, тобто певною послідовністю дій. Алгоритми можуть бути не лише в математиці чи управлінні, а й у навчанні, грі в шахи, винахідництві, композиції музики тощо. При цьому, допускаючи примусовість логічних дій, ми знаємо, що там можуть бути дії, які не формалізуються, зокрема творча діяльність, інтуїція, поняття краси та смаку.

Системність діяльності слід підвищувати з урахуванням таких основних моментів:

- будь-яка діяльність алгоритмічна;
- не завжди алгоритми реальної дійсності виконуються свідомо (композитор, водій);
- у разі незадовільного результату причиною невдачі може бути недосконалість алгоритму.

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

- механізація;
- автоматизація;
- кібернетизація, насамперед використання інтелектуальних систем.

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

До об'єктивних причин розвитку системних уявлень належать системність практичної діяльності людини та внутрішня системність мислення людини.

Виникає запитання: може системність — це специфічна особливість людини, свого роду пристосування для власної зручності, спрощення своєї діяльності, а сам світ байдужий до того, хто і як його пізнає та чи пізнає взагалі? Може цей світ не має нічого спільного з нашими уявленнями про нього?

Щодо мислення філософи мали різні думки, давали різні відповіді. Наприклад, матеріаліст-метафізик Ф. Бекон вважав, що розумова побудова повністю довільна і нічому не відповідає у природі. З іншого боку, голландський філософ-математик XVII ст. Б. Спіноза стверджував, що порядок та зв'язок ідей такі самі, як і порядок та зв'язок речей, оскільки субстанція мислення та субстанція протяжності становлять одну й ту саму субстанцію.

І. Кант, у філософії якого переплелися суб'єктивно-ідеалістичні ідеї з агностицизмом та матеріалізмом, дійшов висновку, що системність — це властивість природи. Він зазначав, що закон розуму, який потребує пошуків цієї єдності, необхідний, оскільки без нього ми не мали б ніякого зв'язного застосування розуму, а без цього застосування не мали б істинності; з огляду на це ми маємо, таким чином, припустити систематичну єдність природи неодмінно як об'єктивно значуще та необхідне.

Е. Дюрінг стверджував, що сутність будь-якого мислення полягає в об'єднанні елементів свідомості в єдність. Водночас Ф. Енгельс із цим не погоджувався. Він вважав, що, по-перше, мислення складається стільки ж у розкладанні предметів свідомості на їхні елементи, скільки в об'єднанні зв'язаних один з одним елементів у деяку єдність. Без аналізу немає синтезу. По-друге, мислення, якщо воно не допускає промахів, може об'єднувати елементи свідомості в деяку єдність лише в тому разі, якщо в них або в їхніх реальних прообразах ця єдність вже до цього існувала.

Ф. Енгельс також зазначав, що над усім нашим теоретичним мисленням панує з абсолютною силою той факт, що наше суб'єктивне мислення та об'єктивний світ підпорядковані одним і тим самим законам і що саме вони не можуть суперечити один одному, а мають узгоджуватися між собою, а також те, що продукти людського мозку, які в кінцевому рахунку є також

продуктами природи, не суперечать решті зв'язків природи, а відповідають їй.

Витоки системного аналізу, методичних концепцій ґрунтуються на дисциплінах, які розглядають проблеми прийняття рішень — теорії дослідження операцій та загальної теорії керування.

Проблема прийняття рішень: будь-яка діяльність — ланцюг прийняття рішень, вибір однієї з альтернатив. У складних ситуаціях часто буває важко приймати рішення. Нині є дисципліна — теорія прийняття рішень, яка разом із необхідним інструментарієм (ПЕОМ, мережі) стала сучасним системним аналізом. Системний аналіз зародився в глибині історії людства — торгівля, військово мистецтво, виробництво.

Проте наука повинна мати свою методологію, а не лише набір правил, і системний аналіз став науковою дисципліною тоді, коли створилися відповідні моделі, методична спільність аналізу задач різної фізичної природи. Становлення системного аналізу (кінець XIX — початок XX ст.) — роботи з теорії регулювання, в економіці вперше — оптимальні рішення, уявлення про функції мети (корисності), В. Парето сформулював перший принцип компромісу.

Розвиток теорії прийняття рішень передбачає:

- розвиток математичного апарату, способів формалізації;
- нові завдання у промисловості, економіці, військовій справі.

Після 50-х років XX ст. виникла синтетична дисципліна — «дослідження операцій», яка вросла в системний аналіз як синтез дослідження операцій і теорії керування.

Для спеціалістів з автоматизації виробництва найвідповідальнішим етапом є початок розроблення систем — аванпроекування (вибір структури, технічних засобів, програмного забезпечення тощо). Від цього багато що залежить у майбутньому, в тому числі вартість їх розроблення та експлуатації.

Становлення та історія розвитку системних уявлень. Для виникнення та розвитку системних теорій і понять були об'єктивні причини: такі теорії не могли не виникнути, більш того — вони постійно розвиваються, і сьогодні ми є свідками лише чергового етапу розвитку.

Головним результатом сучасного розвитку системних уявлень є їхня «матеріалізація», тобто використання для потреб практики.

Сучасний етап розуміння системності пройшов складний шлях. Історично системні уявлення спочатку розвивалися

різними шляхами, із різних позицій до сьогодні, а далі будуть продовжуватись.

Між системними уявленнями й методами конкретних наук існують певні протиріччя, оскільки вони притримуються протилежного, індуктивного методу — від досліджень реальних систем до встановлення загальних закономірностей. З іншого боку, системність завжди була методом будь-якої науки, зокрема філософії, логіки, математики. Найбільше нас цікавить системність як об'єкт дослідження для природничих і технічних наук.

Кібернетика. Питання про науковий підхід до керування складними системами першим поставив А. Ампер. Він спробував класифікувати різні, в тому числі неіснуючі тоді науки (1834—1843), виокремивши спеціальну науку про управління державою — кібернетику, особливо підкресливши основні її системні особливості.

У 1843 р. польський філософ-гегельянець Б. Трентовський опублікував книгу «Ставлення філософії до кібернетики як до мистецтва керування народом», в якій розглядаються наукові основи практичної діяльності керівника (кібернетика).

Одне з положень системного підходу — складну систему можна створити (синтезувати) з обмеженої кількості окремих частин. Вражаючим було відкриття основоположника теорії систем академіка Є.С. Федорова (1891 р.), який зазначав, що може існувати лише 230 різних типів кристалічних ґраток, хоча будь-яка речовина за певних умов може кристалізуватись. Тобто вся величезна різноманітність природних тіл реалізується з обмеженої й незначної кількості початкових форм.

Наступний етап у розвитку системності як окремого предмета пов'язаний з іменем О.О. Богданова (справжнє прізвище — Малиновський). У 1911—1925 рр. вийшли три томи його книги «Загальна організаційна наука (Тектологія)». Головна ідея — всі існуючі об'єкти, процеси мають певний ступінь, рівень організованості, причому тектологія повинна вивчати загальні закономірності організації для всіх рівнів організованості. Всі явища розглядаються як неперервні процеси організації та дезорганізації. Чіткого поняття організації він не вводить, але зазначає, що *рівень організації тим вищий, чим сильніше властивості цілого відрізняються від простої суми властивостей його частин.*

Особливість тектології полягає у тому, що головна увага приділяється закономірностям розвитку організації, вивченню

співвідношень стійкого та мінливого, значенню зворотних зв'язків, урахуванню власних цілей організації (які можуть сприяти цілям організації або суперечити їм), ролі відкритих систем.

Вчений показав, що в складних системах є проблема криз, тобто моментів, коли обов'язково є корінна, «вибухова» перебудова її структури. Наголошувалося на ролі математики та моделювання під час розв'язування задач тектології. З цього видно, що вчений вперше сформулював або й випередив багато з положень сучасних кібернетичних та системних теорій.

О.О. Богданов був надзвичайно складною особистістю — медик, талановитий та самонадіяний, який часто втрачав почуття міри, серйозно вивчав філософію, від матеріалізму перейшов на позиції механіцизму, створив власну філософію — емпіріомонізм. За радянської влади написав «Короткий курс політичної економії», а потім створив перший у світі Інститут переливання крові, став його директором. Деякі висновки тектології робив на прикладі складної системи — кров'яної. Проводив ризиковані досліди, один із яких закінчився трагічно — він загинув. Вважав, що з часом тектологія зробить не потрібною філософію.

Цікавим фактом є те, що системотехніки різні за спеціальністю: А. Ампер — фізик; Б. Трентовський — філософ; Є. Федоров — геолог; А. Богданов — медик; Н. Вінер — математик; Л. Бертоланфі — біолог; І. Пригожин — фізик. Це — найкраща ілюстрація системності природи.

Кібернетика Вінера. Явне та масове засвоєння системних понять, визнання системності світу почалося з праць американського математика Н. Вінера (1948 р. — його книга «Кібернетика»). Початкове його визначення кібернетики як «науки про управління та зв'язок у тваринах і машинах» не відображало сферу інтересів кібернетики — сюди входять також процеси, які відбуваються у суспільстві. Спочатку, після виникнення кібернетики, було багато сумнівів: а що ж є предметом досліджень? Чи є в кібернетичі свій предмет досліджень, оскільки вона розглядає різні процеси — технічні, біологічні, економічні. Перший міжнародний конгрес із кібернетики (Париж, 1956 р.) навіть прийняв пропозицію вважати кібернетику не наукою, а «мистецтвом ефективної дії».

Багато було сказано про кібернетику, в тому числі й відверто ворожого, але нині вона є загальноновизнаною наукою. Розглянемо деякі визначення цього терміна.

Кібернетика — наука про оптимальне керування складними динамічними системами (А.І. Берг).

Кібернетика — наука про системи, які сприймають, зберігають, переробляють та використовують інформацію (А.М. Колмогоров).

Таким чином, предметом кібернетики є дослідження систем, причому природа системи має другорядне значення.

Для системних досліджень кібернетика Вінера дала розвиток таких уявлень:

- типізація моделей;
- виявлення особливого значення зворотних зв'язків;
- визначення принципів оптимальності при керуванні та синтезі систем;
- усвідомлення ролі інформації як загальної властивості матерії та можливості її кількісних оцінок;
- розвиток методології моделювання, особливо за допомогою ЕОМ.

Водночас для вінерівської кібернетики характерний деякий техніцизм, сучасна різновидність механіцизму. Під час оцінювання інформаційних процесів часто якісний бік поступається кількісному. Крім того:

➤ принципи оптимальності реалізуються лише у повністю формалізованих задачах;

➤ моделювання інтелектуальних систем ґрунтується лише на логічних складових процесу мислення, хоча це найважливіше.

З погляду системних уявлень кібернетика Вінера — важливий етап, на якому виявились як його позитивні сторони, так і явні протиріччя.

Спроби побудови загальної теорії систем. Загальна теорія систем: це паралельний і незалежний від кібернетики підхід чи розділ кібернетики?

Ідею побудови загальної теорії систем, яка не залежить від їхньої природи, висунув австрійський біолог Л. Бертоланфі у 1950 р. Реалізацію цієї ідеї він бачив у тому, щоб знайти структурну спільність законів, які встановлені в різних науках, та вивести на цій основі загальносистемні закономірності. Одним із основних досягнень Л. Бертоланфі є введення поняття *відкритої системи*.

Н. Вінер розглядав внутрішньо системні зв'язки, а функціонування систем — як відгук на зовнішні дії.

Л. Бертоланфі наголошував на особливому значенні обміну між системою та зовнішнім середовищем, речовиною, енергією та інформацією, тобто на встановленні динамічної рівноваги, яка може спрямовуватися на ускладнення організації (всупереч другому закону термодинаміки, завдяки введенню інформації ззовні). Тоді функціонування — не просто відгук на зміну зовнішніх умов, а й збереження старої чи встановлення нової рухомої рівноваги системи. Тут враховуються як кібернетичні ідеї гомеостазису, так і нові моменти, які випливають із біології. Проте дуже приваблива ідея побудувати загальну теорію систем як нову логіко-математичну дисципліну надзвичайно важко реалізується. В кінцевому підсумку може виявитися, що найбільшу цінність загальної теорії систем матиме не стільки її математичне оформлення, скільки розроблення цілей і завдань системних досліджень, розвиток методології аналізу систем, встановлення загальносистемних закономірностей.

Надзвичайно важливий «прорив у незнане» в дослідженні систем здійснили бельгійські вчені школи І. Пригожина (Пригожин І., Стенгерс І. Порядок из хаоса. — М.: Прогресс, 1986). Розвиваючи термодинаміку нерівноважних фізичних систем (Нобелівська премія, 1977 р.), він зрозумів, що виявлені закономірності належать до систем будь-якої природи. Крім заново підтверджених положень, таких як ієрархічність рівнів організації систем, неможливість зведення до одного закономірностей різних рівнів, наявність на кожному рівні організації як детермінованих, так і випадкових процесів, І. Пригожин запропонував нову оригінальну теорію систематики, головним моментом якої є розкриття механізмів самоорганізації систем. Відповідно до його теорії матерія не є пасивною субстанцією, для неї властива спонтанна активність, спричинена нестійкістю нерівноважних станів, на які рано чи пізно перетворюється будь-яка система в результаті взаємодії із зовнішнім середовищем. Важливо, що в такі переломні моменти («особливі точки», «точки біфуркації») принципово неможливо передбачити, чи стане система більш-менш організованою («дисипативною» за Пригожиним).

У навчальному посібнику основну увагу приділено використанню методів системного аналізу для створення складних систем керування (ССК), насамперед комп'ютерно-інтегрованих, об'єктами яких є технічні комплекси або промислові підприємства.

емства в цілому. При цьому основними завданнями є: визначення загальної структури системи; організація необхідної взаємодії між підсистемами і елементами; врахування впливу зовнішнього середовища; оптимізація структури системи; розроблення оптимальних алгоритмів функціонування.

Проектування складних систем керування поділяють на дві стадії: макропроекування (зовнішнє), коли методами системотехнічного та архітектурного синтезу розв'язують задачі функціонально-структурного характеру; мікропроекування (внутрішнє), коли розробляють технічні рішення в межах проекту системи.

Практичне використання результатів системного аналізу та характеристика основних задач. Необхідність системного підходу до розв'язання комплексних задач у різних сферах діяльності людини — об'єктивна реальність та запорука отримання ефективних рішень. Л. Бертоланфі зазначав, що системний підхід став нагальною потребою. Коли задано певну мету, то для знаходження шляхів і засобів її досягнення потрібен фахівець або група фахівців у галузі систем, які розглядають альтернативні розв'язки й вибирають ті з них, котрі забезпечують оптимізацію, найбільшу ефективність та мінімальні витрати в надзвичайно складних схемах взаємодій.

Нині системному аналізу належить особливе місце у створенні та дослідженні складних систем, що безпосередньо зумовлено потребами практики. В умовах функціонування складних структурних утворень актуальними завданнями є:

- дослідження взаємодії об'єктів та систем із зовнішнім середовищем (визначення меж об'єктів / систем, реальних ресурсів взаємодії, зв'язок із системами вищих рівнів);

- конструювання нових альтернатив розвитку системи за часом і в просторі, дослідження основних парадигм пошукового мислення;

- конструювання великої кількості імітаційних моделей, кожна з яких розв'язує специфічні задачі;

- розроблення моделей прийняття рішень, формування цільових структур, програм і планів (теорія оцінювання ефективності прийняття рішень, планів, програм; розв'язування проблеми багатокритеріальності; дослідження проблеми невизначеності) тощо.

Типові постановки задач системного аналізу. Зі зростанням складності об'єктів і систем, різноманітних зв'язків між ними

виникла потреба у використанні математичних методів у задачах оптимізації різної природи та призначення. До типових системних належать такі задачі:

- розподіл ресурсів: може бути задано роботи та ресурси, потрібно розподілити ресурси між роботами так, щоб досягти максимального ефекту, наприклад прибутку. Можна задавати лише роботи або ресурси;

- керування запасами: формування інтенсифікаційної бази, облік; розроблення правил прийняття рішень; побудова моделі системи керування; отримання оцінок прогнозування роботи системи;

- організація обслуговування обладнання (поточне обслуговування; оцінювання роботоздатності та діагностика відмов, ремонтно-відновлювальні роботи). У цій задачі основне місце належить ймовірнісним методам;

- масового обслуговування: утворення та функціонування черг (потоки вимог, які надходять у канал обслуговування). У цій задачі черголінійний ланцюг об'єктів, які вишикувались один за одним для обслуговування (залізничні каси, надходження у майстерню техніки для ремонту, черга пацієнтів до лікаря тощо);

- керування проектами;

- аналізу ризиків та безпеки використання нових технологій.

Наймасштабніші дослідження та розроблення, в яких застосовувався системний підхід, належать до створення комплексів у військовій галузі (нові види озброєння, засоби протипожежної оборони та ін.), освоєння комплексу, розроблення та будівництва АЕС, розв'язання екологічних проблем, прогнозування розвитку галузей народного господарства тощо.

У системному аналізі застосовують такі математичні методи:

- лінійного програмування (задача розподілу ресурсів);

- нелінійного програмування (задача керування запасами);

- статистичного аналізу, диференціальних рівнянь, теорія відновлення (задачі організації масового обслуговування);

- керування проектами та ймовірнісного аналізу безпеки (статистичний аналіз, евристичні процедури);

- розв'язування екстремальних задач — основа системного аналізу.

Для будь-яких системних задач послідовно виконують такі кроки (етапи):

➤ формалізація, опис мовою математики. Тут важливо використовувати моделі, які є адекватними, точними, але без зайвих деталей та неістотних факторів;

➤ формування критеріїв оцінювання якості результатів, порівняння варіантів з урахуванням багатокритеріальності, невизначеностей;

➤ урахування «людського фактора».

У другій половині ХХ ст. сформувалася методологія системного підходу до розв'язування складних проблем у різних сферах діяльності людини. Лише використання міждисциплінарних методів може забезпечити прийняття рішень в умовах високого рівня невизначеності та ризику. Системні дослідження і методи орієнтовані на використання новітніх комп'ютерних технологій сучасних уявлень загальної теорії керування.



МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

1.1. Визначення системного аналізу

Для узагальнення різних напрямів досліджень, різних дисциплін, в яких розглядається аналіз та синтез складних систем, використовують терміни «системний аналіз», «системний підхід». При цьому такими термінами широко користуються філософи. Стосовно проблем керування в складних системах застосовували також терміни «системотехніка», «системологія».

Паралельно з дослідженнями, які явно використовували термін «система», у 60 — 70-х роках ХХ ст. виникали міждисциплінарні напрями, що мали свою проблематику, але були фактично орієнтовані на системні дослідження, зокрема ситуаційне моделювання, ситуаційне керування, інформаційний аналіз (підхід) систем. Починаючи з 80-х років ХХ ст., активно розвивається синергетика — науковий напрям, який досліджує загальні закономірності в процесах керування, стійкості та руйнування впорядкованих часових і просторових структур у складних нерівноважних системах різної фізичної природи. І. Пригожин досліджував процеси та моделі в нелінійній термодинаміці, дисипативні процеси, в результаті яких з неупорядкованих однорідних сигналів під впливом флуктуацій можуть руйнуватися попередні та виникати якісно нові структури внаслідок дисипації (розсіювання) енергії системи та отримання нової енергії з середовища.

Синергетика розвивається як самостійний напрям. Проте останніми роками вона дедалі більше зближається з теорією систем, зокрема в дослідженні процесів самоорганізації та формуванні синергетичної теорії керування.

Термін «системний аналіз» часто використовувався як «аналіз систем» (синонім), але в будь-якому разі системний аналіз відіграє основну роль у розв'язанні складних проблем, зокрема керуванні складними об'єктами в умовах невизначеності.

У технічній літературі системному аналізу приділяється багато уваги і підкреслюється його застосування в різних сферах діяльності людини для:

- розв'язування задач (проблем), коли не існує формальних математичних моделей, тобто за значної початкової невизначеності проблемної ситуації;

- постановки задач як складного процесу з використанням формальних методів і якісного аналізу;

- дослідження загальносистемних закономірностей з використанням основних понять теорії систем та філософських концепцій;

- організації процесу колективного прийняття рішень, об'єднуючи спеціалістів різних галузей знань;

- об'єднання методів формалізованого подання систем та інтуїції і досліду фахівців-експертів з розробленням методики системного аналізу;

- дослідження процесів цілеутворення та розроблення засобів аналізу цілей, їхньої структуризації;

- розчленування значної невизначеності (аналіз) на доступніші для дослідження зі збереженням цілісного (системного) уявлення про об'єкт та проблемну ситуацію.

На основі викладеного термін «*системний аналіз*» (СА) можна визначити так:

- синтетична дисципліна, яка відображає міждисциплінарний характер системних досліджень, реалізовує сучасну форму синтезу наукових знань. Міждисциплінарність виражається в тому, що системний аналіз досліджує об'єкти, для опису яких залучаються методи різних традиційних наукових дисциплін. При цьому в системних дослідженнях на відміну від традиційних підходів розглядаються не окремі сторони об'єкта або явища, а головним є *системний ефект*, коли об'єднання елементів або об'єктів у систему приводить до появи нових властивостей. У цьому разі використовуються як формалізовані методи, так і неформальні процедури, СА — насамперед певний тип науково-технічної діяльності, що необхідна для дослідження та керування складними об'єктами:

- сукупність методів, що ґрунтуються на використанні ЕОМ і орієнтованих на дослідження складних систем — технічних, економічних, екологічних та ін.;

- обширна синтетична дисципліна, яка охоплює низку розділів, що мають характер самостійних наукових дисциплін.

Принципи системного підходу:

- кінцевої мети — абсолютний пріоритет кінцевої (глобальної) мети;

- єдності — сумісний розгляд системи як цілого і як сукупності систем (елементів);

- зв'язності — розгляд будь-якої частини сумісно з її зв'язками з оточенням;

- модульної побудови — корисно виокремити модулі в системі й розглядати її як сукупність модулів;

- ієрархії — доцільно ввести ієрархію частин (елементів) та (чи) ранжування їх;

- функціональності — сумісний розгляд структури й функцій з пріоритетом функцій над структурою;

- розвитку — врахування змінюваності системи, її здатності до розвитку, розширення, заміни частин, накопичення інформації;

- децентралізації — поєднання в ухвалюваних рішеннях і керуванні централізації та децентралізації;

- невизначеності — врахування невизначеностей та випадковостей у системі.

Ознаки системного підходу. *Системний підхід* — конкретно-науковий метод, який має загальнонаукове значення.

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

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

Використання системного підходу зручно формувати, опираючись на ознаки систем.

1. Визначено однозначно, що система — сукупність взаємопов'язаних підсистем, тому вивчення системи завжди починають із визначення її структури — кількості підсистем, їх зв'язності (відношень), тобто кожному з підсистем вивчають з урахуванням зв'язків між ними, а не ізольовано. Важливо виявити найістотніші зв'язки, так звані *системоутворювальні*, які найбільше впливають на результати досліджень.

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

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

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

3. Підсистеми взаємодіють у процесі цілеспрямованого функціонування системи, тому особливого значення набуває визначення та вивчення мети функціонування системи. Фактичні цілі функціонування підсистем мають відповідати цілям системи, тобто існує *принцип єдності цілей*. Якщо він порушується, то його слід поновити, що істотно підвищує ефективність функціонування системи.

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

➤ враховувати вплив зовнішнього середовища на досліджувану систему та результати цього впливу;

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

5. Досліджувана система та інші, з якими вона пов'язана (зовнішнє середовище), часто є динамічними, які розвиваються, тобто істотну роль відіграє *фактор часу* з двох точок зору:

➤ досліджують як статичні, так і динамічні властивості систем;

➤ досліджують розвиток системи з часом та рушійні сили цього розвитку.

Отже, важливо визначити прогноз взаємодії системи із зовнішнім середовищем.

6. Системний підхід як самостійний методологічний напрям формувався та розвивався одночасно з розвитком прикладної математики, тому глибина й ефективність дослідження систем

визначається також повнотою використання математичних методів.

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

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

З цього випливає використання методу аналогій, але потрібна обережність, щоб не довести його до вульгаризації.

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

Декомпозиція — розкладання цілого на частини: задачі — на підзадачі; системи — на підсистеми. Це дає змогу спрощувати загальну задачу, скорочувати її розмірність та використовувати простіші моделі.

Агрегування — об'єднання частин у ціле, завдяки чому можна отримувати нові якісні та кількісні показники системи. У цьому проявляється властивість емерджентності, коли нове об'єднання (нова система) має такі властивості, яких не має жоден з елементів, що об'єднуються. Наочний приклад прояву цієї властивості наведено на рис. 1.1.

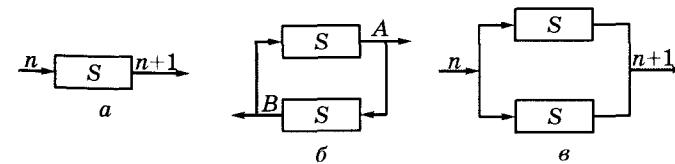


Рис. 1.1. Схеми з'єднань елементів

Цифровий автомат S перетворює будь-яке число на вході на нове число на виході, яке на одиницю більше від вхідного (рис. 1.1, a). Зі з'єднанням двох автоматів S у кільце (рис. 1.1, b) система генерує зростаючу послідовність на виходах A і B , одна

з яких складається з парних чисел, інша — з непарних. За паралельного з'єднання (рис. 1.1, в) реалізується задача резервування.

1.2. Процедури системного аналізу

Системний аналіз як самостійна наукова дисципліна має свої методи, способи та засоби розв'язування складних проблем. У технічній літературі виокремлюють такі процедури аналізу складних систем: цільовий, ситуаційний, інформаційний, структурно-функціональний, організаційно-процедурний, техніко-економічний.

Цільовий аналіз призначений для виявлення часткових цілей поведінки складної системи для досягнення головної мети:

- послідовна багаторівнева декомпозиція множини цілей на цілі елементів для ієрархічних рівнів;
- формування кількісних показників для оцінювання ступеня та рівня досягнення загальної мети системи і локальних цілей елементів;
- встановлення функціонального взаємозв'язку цільових показників елементів різних ієрархічних рівнів та систем у цілому;
- визначення часових інтервалів зміни цільових показників функціональних елементів з урахуванням допустимих інтервалів зміни показників цільової функції системи.

Для технологічних комплексів цільовий аналіз передбачає узгодження загального показника ефективності функціонування з показниками підсистем.

Ситуаційний аналіз передбачає виявлення ситуацій та їхніх характеристик, які визначають умови функціонування складної системи:

- формування множини керованих штатних ситуацій, прогнозування ймовірності виникнення позаштатних та критичних ситуацій. Поняття «ситуація» характеризує стан системи та середовища відповідно до апіорі визначення інтервалів їхніх параметрів. Штатні ситуації характеризують роботу системи в межах цих інтервалів; позаштатні — роботу, коли окремі показники виходять за межі інтервалів, але це не приводить до порушення функціонування або руйнування системи. Критичні ситуації характеризуються виходом основних параметрів за межі встановлених інтервалів, що може

зумовлювати руйнування системи, загрози для персоналу та небезпечні екологічні наслідки;

- визначення кількісних показників для оцінювання різних ситуацій, умов переведення нештатних ситуацій у штатні, умов запобігання критичним ситуаціям.

Інформаційний аналіз дає можливість визначати обсяг, повноту та інші показники інформації про систему та середовище:

- визначення повноти, вірогідності та своєчасності одержання інформації для керування системою у штатних та позаштатних ситуаціях;
- визначення характеристик інформаційних потоків;
- вибір та аналіз процедур одержання, збереження, оброблення інформації для забезпечення керованості системи в різних ситуаціях;
- вибір та аналіз процедур формування, обґрунтування й ухвалення рішення під час керування системою в штатних ситуаціях і перехідних режимах;
- визначення необхідних показників інформаційного забезпечення процедур діагностики та прогнозування розвитку системи.

Структурно-функціональний аналіз дає змогу визначати необхідний рівень потенціальних можливостей функціональних елементів системи, їхній ступінь взаємодії та взаємозалежностей:

- визначення множини функцій для досягнення мети в певних умовах функціонування;
- формування ієрархічної структури системи відповідно до поставленої мети та існуючих обмежень на ресурси;
- визначення функціонально повного набору елементів для кожного рівня ієрархії та їхніх характеристик.

Організаційно-процедурний аналіз застосовують для виявлення способів організації процесів керування та вибору процедур для досягнення мети:

- формування функціонально повного набору процедур керування в різних ситуаціях, раціональний розподіл їх між людиною (ОПР) та технічними засобами;
- визначення та оптимізація організаційної й технічної структур системи керування в різних ситуаціях;
- визначення необхідного рівня інтелектуальності технічних засобів та підстави підтримки прийняття рішень.

Техніко-економічний аналіз дає змогу визначати необхідні ресурси для поставленої мети і передбачати ефект від впровадження розробленої системи:

➤ визначення витрат усіх видів ресурсів не лише на технічні засоби, а й на реалізацію процедур керування;

➤ урахування можливості витрат ресурсів на запобігання позаштатним і критичним ситуаціям.

У системному аналізі виокремлюють три головних напрями, три етапи дослідження складних систем:

➤ побудова необхідних моделей не лише окремих елементів і систем у цілому, а й моделей прийняття рішень у різних ситуаціях;

➤ постановка задачі дослідження;

➤ розв'язування задач та реалізація отриманих рішень.

Системному аналітику доводиться використовувати у формалізованому або якісному вигляді комплекс процедур, які можна деталізувати так:

➤ дослідження структури системи, аналіз її компонентів, виявлення взаємозв'язків між окремими елементами;

➤ отримання даних про функціонування системи, дослідження інформаційних потоків, проведення необхідних експериментів та спостережень;

➤ побудова моделей, перевірка їхньої адекватності, аналіз чутливості та невизначеності;

➤ аналіз ресурсних можливостей;

➤ формування цілей та критеріїв;

➤ генерування альтернатив;

➤ реалізація вибору та прийняття рішень;

➤ впровадження та оцінювання результатів системного аналізу.

Системну методологію характеризують такі властивості:

➤ результативність — можливість отримати прийнятний розвиток прикладних системних задач, які часто мають неповну, неточну, суперечливу інформацію. Практично прийнятним розв'язком називають результат, який задовольняє дослідника з погляду необхідної точності, вірогідності та обґрунтованості;

➤ ефективність — здатність методології забезпечувати кінцевий результат у формі розв'язків реальних системних задач за прийнятний час із допустимими витратами ресурсів (обчислювальних, фінансових та ін.). Економічний, соціальний, екологічний чи інший ефект від розв'язання системної задачі має компенсувати витрати на його отримання;

➤ масштабність, яка характеризує коло задач, які відрізняються багатьма факторами, зокрема природою об'єкта, а які можна розв'язувати за системною методологією.

Принципи системної методології:

➤ системної погодженості — функціонально та структурно узгоджені методи, методики, алгоритми, пакети прикладних задач;

➤ функціональної ортогональності як реалізації процедур у вигляді сукупності функцій, незалежних від інших;

➤ процедурної повноти — реалізація всіх процедур: від формалізації системної задачі до верифікації отриманих результатів;

➤ інформаційної взаємозалежності щодо вихідної інформації та результатів виконання процедур;

➤ цілеспрямованої відповідності для досягнення єдиної мети за рахунок взаємно погоджених методик і процедур;

➤ функціональної раціональності як недопустимість взаємного дублювання функцій системної методології;

➤ багатоцільової загальності як можливість розв'язування різнотипних системних задач;

➤ багатофакторної адаптивності — пристосування до особливостей системних задач та вимог ОПР і відкритості, тобто зміни процедур або їхнього структурного та (або) функціонального агрегування;

➤ раціональної доповнюваності — використання у разі потреби додаткових методів, способів та процедур.

1.3. Визначення систем

Протягом відносно короткої історії становлення теорії систем і системного аналізу уявлення про системи та закономірності їх побудови, функціонування та розвитку постійно уточнювалися та переосмислювалися. При цьому розглядалися такі закономірності, які характеризують будь-яку систему, але кожна виділена система має свої характерні ознаки, а також призначення, розміри, фізичну природу тощо.

У літературі можна знайти кілька десятків визначень системи, якими оперують спеціалісти різних галузей науки і техніки. Потреба у використанні поняття «система» виникла в стародавні часи: ще Аристотель звернув увагу на те, що ціле (тобто система) не зводиться просто до суми складових елементів (частин), більше того, система може набувати таких властивостей, яких не має жоден елемент, тобто існують системні ефекти. Термін «система» використовують тоді, коли йдеться про складний об'єкт (проблему, явище), який не

можна точно відобразити однією моделлю, особливо за умов функціонування з урахуванням невизначеностей.

У теорії автоматичного керування значну увагу приділяють системам автоматичного регулювання (САР), або автоматичним системам регулювання (АСР), для яких визначаються такі загальносистемні показники, як стійкість, якість перехідних процесів. САР (АСР) незалежно від призначення завжди складаються з об'єкта, автоматичного регулятора, давачів та допоміжних елементів. Для складних систем створюються багаторівневі ієрархічні структури.

Залежно від задач і проблем дослідники користуються різними визначеннями системи, але головними ознаками за будь-яких умов є те, що система складається з окремих частин (підсистем, елементів), призначена для виконання конкретних цілей, взаємодіє з іншими системами та середовищем.

Використовуючи теоретико-множинні уявлення, систему подають як елементи (частини, компоненти) a_i та зв'язки (відношення) r_j між ними:

$$S = \langle A, R \rangle; A = \{a_i\}; R = \{r_j\}. \quad (1.1)$$

При цьому передбачається, що система — не просто сукупність елементів і зв'язків, а враховуються лише такі з них, які розміщуються в області перетину. Якщо в явному вигляді враховується множина цілей системи, то

$$S = \langle A, R, Z \rangle; A = \{a_i\}; R = \{r_j\}; Z = \{Z_k\}. \quad (1.2)$$

У деяких визначеннях системи враховують умови цілеутворення — середовище SR та інтервал часу ΔT , тобто період існування системи та її цілей. Тоді

$$S = \langle A, R, Z, SR, \Delta T \rangle. \quad (1.3)$$

Цей вираз може бути основою однієї з методик структуризації цілей. Тоді використовують таке визначення: *система* — кінцева множина функціональних елементів та відносин між ними, виділена із середовища відповідно до певної мети в межах заданого часового інтервалу.

У визначення системи крім елементів, зв'язків і цілей можна вводити також спостерігача N . Тоді

$$S = \langle A, R, Z, SR, \Delta T, N \rangle. \quad (1.4)$$

У різних системних дослідженнях можна не виділяти окремі елементи, а підкреслювати загальносистемні ознаки. У цьому разі

$$S = \langle Z, STR, TECH, COND \rangle, \quad (1.5)$$

де $STR = \{STR_{тех}, STR_{орг} \dots\}$ — сукупність структур, які реалізують цілі (технічна, організаційна та ін.); $TECH = \{meth, means, alg \dots\}$ — сукупність технологій (методи, засоби, алгоритми), які реалізують систему; $COND = \{\varphi_{ex}, \varphi_{in}\}$ — умови існування системи, тобто фактори, які впливають на її створення та функціонування (зовнішні, внутрішні).

Для дослідження систем керування зручно користуватися таким визначенням: *система* — впорядкована множина структурно взаємопов'язаних і функціонально взаємозалежних елементів.

Це визначення дає можливість перейти до понять *складна система, велика, надвелика, глобальна, глобальна суперсистема*, послідовно замінюючи слово «елемент» в основному визначенні на «систем — складних систем — великих систем — надвеликих систем — глобальних систем». Наприклад, за цією схемою поняття «велика система» формулюють так: впорядкована множина структурно взаємопов'язаних і функціонально взаємозалежних *складних систем*.

У системному аналізі складних систем керування важливими аспектами є процеси організації та адаптивності, тому наведемо ще одне формулювання поняття системи: це функціонально визначена структурно впорядкована з адаптивною реорганізацією множина елементів. Зовнішні та внутрішні функції систем, їхні ієрархічні або однорівневі структури характеризуються відповідними обмінними потоками, адаптивна організація і дезорганізація систем є визначальною для їхнього існування властивістю.

Крім того, існують прості визначення системи, які характеризують окремі властивості, підкреслюють їх. Наприклад, система — це:

➤ засіб досягнення мети в конкретних умовах за існуючих ресурсів;

➤ сукупність взаємопов'язаних елементів, які уособлені від зовнішнього середовища, але взаємодіють із цим середовищем як єдине ціле.

Для характеристики побудови та функціонування систем додатково використовують такі поняття.

Елемент — найпростіша неподільна частина системи, властивості якої визначаються конкретним завданням. Наприклад, елементом може бути технологічний процес відносно виробництва в цілому або елементарна частинка (атом). Залежно від мети дослідження в системі можна виділити різну кількість елементів.

Підсистема — певне об'єднання елементів, на які поділяється система. Підсистема — більша компонента відносно елемента, але детальніша, ніж система. У підсистему об'єднуються елементи, які є взаємопов'язаними та здатними виконувати відносно незалежні функції, підцілі, щоб забезпечити досягнення мети системи в цілому. Саме термін «підсистема» підкреслює, що виділена частина повинна мати властивості системи, зокрема властивість цілісності. Об'єднання елементів у підсистему відрізняється від інших частин, які не мають спільної мети, для чого використовується термін «компонента».

У посібнику значне місце приділено системному аналізу технологічних комплексів, елементами яких є технологічні процеси та апарати, а підсистемами — їх об'єднання на рівні відділень чи цехів. Наприклад, для цукрового виробництва — відділення бурякопереробне, очищення соку, випарювання та ін., для хлібопекарського — приготування тіста, випічки тощо. В системному аналізі самостійну задачу, таку як виділення оптимальної кількості підсистем, часто розв'язують виходячи з того, що зі збільшенням кількості підсистем спрощується керування ними, але значно ускладнюється координація (узгодження) їхнього функціонування.

Структура відображає найістотніші взаємозв'язки між елементами, компонентами й підсистемами, які мало змінюються в процесі функціонування систем і забезпечують існування системи та її властивості. Структура системи може подаватися графічно, у вигляді теоретико-множинних уявлень, матриць, графів та спеціальних комп'ютерних мов. Для складних систем керування виокремлюють функціональну, технічну, алгоритмічну, організаційну структури.

У системному аналізі особливе місце належить аналізу ієрархічних структур як впорядкованих компонент за ступенями важливості. Між рівнями ієрархічної структури можуть існувати взаємозв'язки строгої підпорядкованості компонент

(вузлів) нижчих рівнів однієї з компонент вищого рівня, які називають *деревоподібними структурами*. В ієрархічній структурі на відміну від слабких зв'язків можуть бути також інші, складніші, які в системному аналізі називають «стратами», «шарами», «ешелонами».

Зв'язок забезпечує виникнення і збереження структури та цілісних властивостей системи, може характеризувати як будову (статика), так і функціонування (динаміка) системи.

Зв'язок характеризується напрямками, силою і характером дії, що дає можливість виокремити направлені та ненаправлені, сильні й слабкі, рівноправні (байдужі) зв'язки керування. У складних системах зв'язок можна оцінювати за місцем прикладення (внутрішні та зовнішні) і напрямком (прямі й зворотні).

Найважливішим у системах керування є поняття «зворотний зв'язок», що характерно для технічних систем, але менш чітко проявляється в організаційних системах. Зворотний зв'язок є основою саморегулювання системи, її розвитку, пристосування до змінюваного зовнішнього середовища.

Стан системи — миттєва оцінка чи фаза розвитку, ще визначається або через входні та вихідні змінні, або за допомогою спеціально виділених координат стану. Наприклад, координатами стану для технологічних об'єктів є тиск, температура, швидкість та прискорення зміни величин, для економічних — прибуток, собівартість, продуктивність. Таким чином, стан — множина істотних властивостей, які характеризують систему в певний момент часу.

Поведінка визначає можливість переходу системи з одного стану в інший: $Z_1 \rightarrow Z_2 \rightarrow \dots \rightarrow Z_i$. Цим поняттям користуються, коли не відомі закономірності таких переходів, але поведінка завжди залежить від входних сигналів системи та зовнішнього середовища.

Зовнішнє середовище характеризує умови, в яких функціонує система.

Модель системи завжди описує певні сторони її поведінки, розвитку, стану. Для конкретної системи об'єктивно існує множина моделей різного призначення, деталізації, виду тощо. Вимоги до моделей, зокрема їхньої точності, адекватності, завжди визначаються характером задачі дослідження.

Рівновага — здатність системи за відсутності зовнішніх збурень або у разі постійних збурень зберігати певний стан як завгодно довго.

Стійкість — здатність системи повертатись у стан рівноваги після того, як під впливом збурень у системі виникли перехідні процеси, а відхилення від рівноваги не перевищують допустимих значень. Часом у системному аналізі користуються терміном «стійкий стан рівноваги». В економічних та організаційних системах, на відміну від технічних, оцінки стійкості та рівноваги важко формалізуються.

Розвиток системи характеризує співвідношення між станами рівноваги та стійкості, перехідними процесами й ситуаціями, в яких може бути система (штатні, нештатні, аварійні тощо).

Мета (цілі) — формулювання очікуваного результату функціонування системи, що приводить у системному аналізі до питань «цілеспрямованості». У системному аналізі розвиваються програмно-цільові принципи, наприклад формування довгострокових програм розвитку галузей промисловості.

Запис системи в символній формі. Залежно від кількості факторів, ступеня абстрактності можна навести низку визначень системи D (від лат. *definition*).

D_1 . Система — деяке ціле:

$$S = H(1,0). \quad (1.6)$$

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

D_2 . Система — організована множина:

$$S = (\text{орг}, M), \quad (1.7)$$

де орг — оператор організації; M — множина.

D_3 . Система — множина речей m , властивостей n і відношень r :

$$S = (\{m\}, \{n\}, \{r\}). \quad (1.8)$$

D_4 . Система — множина елементів, які утворюють структуру і забезпечують певну поведінку в умовах навколишнього середовища:

$$S = (\varepsilon, ST, BE, E), \quad (1.9)$$

де ε — елементи; ST — структура; BE — поведінка; E — середовище.

D_5 . Система — множина входів, виходів, станів, які характеризуються функцією переходів і функцією виходів:

$$S = (X, Y, Z, H, G), \quad (1.10)$$

де X — входи; Y — виходи; Z — стани; H — функція переходів; G — функція виходів.

D_6 . Це визначення важко формулюється. Відповідає рівню біонічних систем і враховує генетичну (родову) основу GN , умови існування KD , обмінні явища MB , розвиток EV , функціонування FC та репродукцію (відтворення) RP :

$$S = (GN, KD, MB, EV, FC, RP). \quad (1.11)$$

D_7 . Це визначення оперує поняттями моделі F , зв'язку SC , перерахунку R , самонавчання FL , самоорганізації FO , провідності зв'язків CO та збудження моделей IN :

$$S = (F, SC, R, FL, FO, CO, IN). \quad (1.12)$$

D_8 . Визначення D_5 доповнюється факторами часу та функціональними зв'язками:

$$S = (T, X, Y, Z, \Omega, V, \eta, \varphi), \quad (1.13)$$

де T — час; X — входи; Y — виходи; Z — стани; Ω — клас операторів на виході; V — значення операторів на виході; η — функціональний зв'язок у рівнянні;

$$y(t_2) = \eta(X(t_1), z(t_1), t_2); \quad (1.14)$$

φ — функціональний зв'язок у рівнянні;

$$z(t_2) = \varphi(X(t_1), Z(t_1), t_2). \quad (1.15)$$

D_9 . Для організаційних систем зручно використовувати цілі та плани PL , зовнішні й внутрішні ресурси RO , RJ , виконавців EX , процес PR , перешкоди DT , контроль SV , керування RD , ефект EF :

$$S = (PL, RO, RJ, EX, PR, DT, SV, RD, EF). \quad (1.16)$$

Можна продовжувати і далі до DN , проте зрозуміло як складно компактно визначити поняття «система».

1.4. Класифікація систем

У системному аналізі класифікації належить особливе місце, враховуючи велику кількість критеріїв, які характе-

ризують структуру системи, її призначення, особливості функціонування тощо. Для класифікації систем найуживанішими є такі критерії.

За *субстанціональною ознакою* можна виокремити три класи систем:

➤ природні, які існують в об'єктивній дійсності (зокрема, нежива і жива природа, атом, молекула, жива клітина, організм, популяція, суспільство);

➤ концептуальні, або ідеальні, які відображають реальну дійсність, об'єктивний світ (наукові теорії, літературні твори), тобто системи, які з різним ступенем повноти відображають об'єктивну реальність;

➤ штучні, створені людиною для досягнення конкретної мети (технічні чи організаційні).

У системному аналізі для задач синтезу та аналізу складних систем керування використовують класифікацію систем за:

➤ видом об'єкта — технічні, біологічні, організаційні та ін.;

➤ науковим спрямуванням — математичні, фізичні, хімічні та ін.;

➤ видом формалізації — детерміновані, стохастичні;

➤ типом цілеспрямованості — відкриті та закриті;

➤ складністю структури і поведінки — прості й складні;

➤ ступенем організованості — добре організовані, погано організовані (дифузні), із самоорганізацією.

Добре організовані системи — це такі, для яких можна визначити окремі елементи, зв'язки між ними, правила об'єднання в підсистеми та оцінити зв'язки між компонентами системи та її цілями. При цьому проблемна ситуація може описуватись у вигляді математичних залежностей, які зв'язують мету та засоби її досягнення — критерії ефективності та оцінювання функціонування. Задачі аналізу та синтезу в добре організованих системах розв'язуються аналітичними методами, наприклад: сонячна система, яка описує найістотніші закономірності руху планет; опис роботи електронного пристрою за допомогою системи рівнянь, які враховують особливості роботи; аналітичні моделі об'єктів керування.

Для відображення досліджуваного об'єкта у вигляді добре організованої системи виокремлюють найістотніші фактори та відкидають другорядні.

У добре організованих системах використовують переважно кількісну інформацію, детерміновані моделі, адекватність яких можна перевірити експериментально.

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

У погано організованих системах застосовують, як правило, якісну інформацію, зокрема нечіткі множини.

Із поняттями «добре організована» та «погано організована» системи тісно пов'язані терміни «добре визначена» та «погано визначена» системи.

Системи із самоорганізацією. Такі системи мають ознаки дифузних: стохастичність поведінки та нестационарність параметрів. Водночас вони можуть чітко адаптуватися до зміни умов роботи. Окремим випадком системи із самоорганізацією для керування технічними об'єктами є адаптивні системи з еталонними моделями чи ідентифікатором.

Системи із самоорганізацією характеризуються непередбачуваністю поведінки, змінюваністю структури у разі взаємодії із середовищем, зберігаючи при цьому властивість цілісності, формуванням варіантів поведінки і вибором із них найкращого.

Останніми роками сформувався новий напрям прикладного системного аналізу — синергетика. *Синергетика* — наука про загальні процеси самоорганізації в складних нерівноважних структурах, яка з наукового погляду пояснює процеси нерівноважної впорядкованості, наприклад в економічній реальності.

Для систем із самоорганізацією задані визначення цілей та вибору засобів, як правило, розділяються, а задача вибору цілей може, в свою чергу, описуватись у вигляді системи із самоорганізацією. Наприклад, для систем керування функціональна структура та структура цілей розбиваються на частини так само, як комплекс технічних засобів.

Великі системи. До виділення систем за складністю та масштабами застосовують різні підходи. Наприклад, для систем керування зручно користуватися класифікацією за кількістю елементів:

➤ малі ($10 \dots 10^3$ елементів);

➤ складні ($10^4 \dots 10^7$ елементів);

- ультраскладні ($10^8 \dots 10^{30}$ елементів);
- суперсистеми ($10^{30} \dots 10^{200}$ елементів).

Часто розділяють поняття «великі» та «складні» системи. Так, англійський кібернетик С. Бір усі кібернетичні системи поділяє на прості та складні залежно від способу опису: детермінованого чи теоретико-ймовірнісного. Російський кібернетик Д.І. Берг кібернетичні системи класифікує на прості та складні за способом опису: складну систему можна описати не менш як двома математичними мовами, наприклад за допомогою диференціальних рівнянь та методами алгебри Буля.

Раніше наводилося кілька визначень основного поняття «система». Так само пояснимо поняття «велика» та «складна» системи. Складність полягає в тому, що чіткої межі між цими термінами немає. Так, у теорії систем великою (складною, системою великого масштабу, Large Scale Systems) називають таку, яка складається з великої кількості взаємопов'язаних і взаємодіючих елементів та може виконувати складні функції. Однією з ознак складної системи керування є показник «живучості»: за відмови певної кількості елементів система продовжує виконувати свої функції, хоча і з меншою ефективністю (проста система може бути лише в двох станах — роботоздатності та відмови).

Велика система — це завжди сукупність матеріальних та енергетичних ресурсів, засобів отримання, передавання та оброблення інформації, людей, які приймають рішення на різних рівнях ієрархії.

Прикладами великих систем можуть бути енергетичні системи, транспортна структура міста, інформаційні системи. Як зазначалося, чіткої межі між складними та великими системами не існує, хоча великі системи додатково характеризуються:

- складністю, що зумовлена наявністю складних зв'язків між елементами, підсистемами та компонентами. При n елементів слід розглядати $n(n - 1)$ зв'язків. Тоді при $n = 10$ кількість етапів системи буде 90, що унеможливорює пряме дослідження цих систем і потребує зменшення (мінімізації) кількості станів системи;
- взаємозв'язок і взаємодія між частинами системи, що при синтезі системи керування приводить до формування оптимальної кількості, наприклад, підсистем у ТК. При цьому виділені підсистеми можуть бути великими системами;

➤ ієрархічність структури в децентралізованих системах керування;

➤ наявність людини в контурі керування (для цього використовують термін «ерготичні системи»), що зумовлює необхідність урахування додаткових соціальних, психологічних, моральних та фізіологічних чинників, які не піддаються формалізації і які може враховувати лише людина. Здебільшого доводиться приймати рішення на основі неповної інформації, використовуючи досвід та інтуїцію. В окремих випадках у системах може не бути супідрядних відносин, а взаємодія відбувається лише «по горизонталі», наприклад міждержавні відносини, зв'язки між підприємствами.

Сама по собі класифікація завжди умовна, наприклад в детермінованих системах містяться елементи стохастичності, а детерміновану систему можна розглядати як окремий випадок стохастичної (за ймовірності, яка дорівнює одиниці).

На особливу увагу заслуговує поділ систем на *відкриті* та *закриті (замкнені)*. Для відкритих систем основною особливістю є здатність до обміну із середовищем речовиною, енергією та інформацією. Для таких систем використовується ентропійний підхід, що характеризує ступінь неупорядкованості, розвиток системи зі зростанням ентропії призводить до її руйнування. У відкритих системах отримання додаткової інформації знижує рівень ентропії, підвищує ступінь впорядкованості.

В економічних та соціальних системах часто виокремлюють їхню *цільспрямованість*. В одних системах цілі можуть задаватися зовні (закриті системи), в інших — формуватись усередині (відкриті, із самоорганізацією).

1.5. Закономірності великих (складних) систем

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

Це закономірності функціонування та розвитку систем, загальносистемні оцінки, які характеризують їхні принципові особливості побудови, функціонування та розвитку.

У задачах системного аналізу виокремлюють чотири групи закономірностей:

- 1) закономірності взаємодії частини та цілого — цілісність або емерджентність, прогресуюча систематизація, прогресуюча факторизація, адаптивність;

2) закономірності ієрархічної впорядкованості — комунікативність, ієрархічність;

3) закономірності здійснення систем — еквівінальність, закон необхідного різноманіття (закон Ешбі), потенціальна здійснюваність;

4) закономірності розвитку — історичність, самоорганізація.

Цілісність системи. Тут розглядається дві взаємопов'язані сторони:

➤ властивості системи як цілого не є сумою властивостей елементів чи підсистем;

➤ властивості системи як цілого залежать однозначно від властивостей елементів, підсистем.

У цьому проявляється складність системи, її поведінка відносно зовнішнього середовища та внутрішній розвиток. У разі виділення окремих елементів чи підсистем вони також можуть бути складними системами, але для інших задач. Під час оцінювання цілісності враховують два фактори:

➤ прогресуючу факторизацію як прагнення системи до такого стану, коли окремі частини набувають незалежності;

➤ прогресуючу систематизацію як зменшення системою названої автономності елементів чи систем.

Інтегративність системи — ця закономірність підкреслює внутрішні процеси системи як збереження цілого і поєднується з цілісністю. Головним в інтегративності є системоутворювальні та системозберігаючі фактори.

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

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

Комунікативність системи характеризує особливі зв'язки системи із зовнішнім середовищем, дає можливість виділити елементи як системи нижчих порядків. Для комп'ютерно-інтегрованих систем керування (КІСК) комунікативність проявляється в потоках інформації, а також у структурах, тобто в мережах різного рівня й призначення, в тому числі корпоративних.

Корпоративна мережа — це обчислювальна мережа на рівні підприємства, фірми чи їхніх об'єднань, у якій одночасно

циркулює інформація різного призначення, тобто технологічна й техніко-економічна.

Ієрархічність системи показує, що жива природа та технічні системи завжди мають кілька рівнів організації, прийняття рішень, задач тощо. Для автоматизованих технологічних комплексів застосовують різні види керування: технологічний апарат (ТА), відділення, підприємство. Тут головними є такі аспекти:

➤ за допомогою ієрархічних уявлень можна відображати системи з різними невизначеностями;

➤ визначення кількості рівнів, побудова всієї ієрархічної системи завжди залежать від завдання та мети системи.

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

Історичність системи полягає у тому, що складні системи функціонують та розвиваються з урахуванням часу.

Закон необхідної різноманітності. Доведено, що для створення системи, яка може розв'язати складну різноманітну проблему, потрібно, щоб система керування мала ще більшу різноманітність. Важливо, щоб ця різноманітність могла створюватися в самій системі. У теорії автоматичного керування (ТАК) існує принцип складності, згідно з яким для керування складним об'єктом має використовуватися складна система керування.

Часто розглядаються також проблеми здійсненості та закономірності цілеутворення.

Узагальнення понять складних систем:

1. Загальними ознаками складних систем (біологічних, технічних, соціально-економічних) є те, що кожна з них становить структурно організовану сукупність простіших частин (підсистем), взаємопов'язаних та взаємодіючих у процесах цілеспрямованого функціонування системи.

2. Кожна із систем входить як підсистема до складу більшої системи (старшого рангу); у свою чергу, підсистеми (крім елементарних) можуть бути системами молодшого рангу.

3. Системи взаємодіють із зовнішнім середовищем, що реалізовується через зовнішні зв'язки (вхідні та вихідні).

4. Процес функціонування системи (у вузькому розумінні) — перетворення ресурсів на вході на цільові кінцеві результати основної діяльності на виході.

5. Ефективність основної діяльності системи характеризується відношенням цільових кінцевих результатів до затрат ресурсів на досягнення цих результатів та на усунення (або обмеження в допустимому діапазоні) негативних наслідків функціонування.

6. Цілеспрямованість процесів функціонування проявляється в намаганні підтримувати та підвищувати високу ефективність системи, адаптуючись до змін зовнішнього середовища.

7. Процеси функціонування системи (у широкому розумінні) — сукупність процесів основної діяльності в різних за масштабами процесів розвитку та вдосконалення систем.

8. Математичний опис процесів функціонування системи — математична модель, але під дією нестационарних випадкових сигналів процеси функціонування часто не можна описати математично, тобто формалізувати.

9. Процеси функціонування систем потребують керування, яке реалізовується за рахунок цілеспрямованих дій та зворотних зв'язків.

10. Процес керування передбачає збирання інформації, її аналіз та контроль, вироблення керувальної дії, її реалізацію.

11. Сукупність органів керування системи та підсистем усіх рівнів разом з інформаційними зв'язками (внутрішні та зовнішні) — ієрархічна система керування.

1.6. Системний підхід до аналізу технологічних комплексів

Ознаки технологічних комплексів (ТК) як складних систем. Головними ознаками ТК є ті, які характеризують деякі якісні сторони. Відомий підхід, коли складною системою (СС) називають таку, математичні моделі якої можна описати принаймні двома способами (детерміновані та стохастичні, теоретико-ймовірнісні тощо). Для характеристики ТК як складних систем виокремлюють такі ознаки:

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

Аналіз ТК як складних систем передбачає визначення та оцінювання їхньої структури, оцінювання матеріальних та енергетичних потоків, формування необхідних інформаційних визначень, що дає можливість визначити структуру керування. При побудові автоматизованих ТК визначається кількість підсистем, розташування точок отримання інформації, розміщення пунктів керування та технічна реалізація системи.

Класифікація ТК можна здійснювати за різними ознаками, але вона має бути такою, щоб виокремити групи (класи) зі спільними характерними ознаками за:

➤ *продуктивністю* — велико-, середньо- та малопотужні чи продуктивні. У промисловості дедалі більше застосовуються ТА великої одиничної потужності, які можуть замінювати групу апаратів, виділяється середня продуктивність, а велико- та малопроductивні апарати мають відрізнятися у два і більше разів;

➤ *способом функціонування* — неперервні, неперервно-періодичні, неперервно-циклічні та періодичні;

➤ *кількістю виконуваних функцій* — одно- та багатофункціональні або одно- та багатонаменклатурні (-асортиментні);

➤ *кількістю ланок* — мало- та багатоланкові;

➤ *однорідністю* — однакові або різні ланки чи підсистеми;

➤ *способом з'єднання технологічних ланок (технологічною топологією)* — одно- або зустрічноспрямовані (зі зворотними зв'язками) і комбіновані;

➤ *цільовою функцією (критерієм оптимізації)* — всі підсистеми можуть мати однакові або різні критерії;

➤ *характеристиками середовища* — рідина, газ тощо.

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

➤ *інформаційна потужність*, яка характеризує інформаційні потоки, тобто визначає характеристики необхідних технічних засобів та програмного забезпечення їх для отримання інформації, її оброблення та подання в потрібному вигляді в зазначене робоче місце в певний час. Інформаційна потужність визначається кількістю змінних, які необхідні для керування та контролю ТК: мала потужність до 40 змінних, середня — до 160, підвищена — до 650, велика — понад 650 змінних. Технологічний комплекс цукрового заводу має 384 точки контролю та 217 точок керування; спиртовий завод — 501 точку контролю і 132 точки керування;

➤ *за кількістю підсистем, для яких існує і необхідна задача оптимізації*, виділяються лише ті підсистеми, для яких є від-

повідні ресурси, а досягнення найвищих техніко-економічних показників для підсистем збігається з критерієм ТК у цілому;

➤ за кількістю підсистем, які координуються (узгоджуються), є ТК, для яких робота n -ї підсистеми потребує зміни умов роботи $(n - 1)$ -ї і $(n + 1)$ -ї підсистем;

➤ за трудомісткістю задач оптимізації та координації є комплекси, в яких задача оптимізації потребує значного часу розв'язання і значних обчислювальних потужностей; такі підсистеми координуються важко.

Системний аналіз технологічних процесів як об'єктів керування. Досліджуючи технологічні процеси як задачі керування, використовують основні способи системного аналізу (системного підходу):

- постановка задачі дослідження;
- вибір критеріїв якості;
- розроблення плану експерименту з виділенням основних етапів;
- виконання принципу ієрархії згори вниз під час аналізу та знизу вгору під час синтезу складних систем та ін.

З позицій системного аналізу розв'язують задачі моделювання, оптимізації, керування та оптимального проектування хіміко-технологічних систем (ХТС) у масштабах ТК, відділення, цеху, заводу. Для цього використовують відповідні математичні моделі.

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

- різноманітністю фізико-хімічних ефектів;
- насиченням взаємних зв'язків між цими ефектами;
- одночасним перебігом та взаємозв'язками між різними явищами фізико-хімічної природи в локальних об'ємах;
- нелінійними залежностями між змінними параметрами тощо.

За системного аналізу виробництва (підприємства) як великої (складної) системи виокремлюють, як правило, три рівні:

➤ типові технологічні процеси в апаратурному оформленні (механічні, гідродинамічні, тепломасообмінні, дифузійні, хімічні та ін.) і локальні системи керування ними;

➤ ТК, відділення, цехи з відповідними системами керування;

➤ виробництво, підприємство та системи оперативного керування, організації виробництва, планування, матеріально-технічного постачання, реалізації продукції.

За системного підходу створюються автоматизовані системи для оперативного отримання математичних моделей, ідентифікації.

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

Беручи до уваги, що на вхід ФХС надходять потоки суцільного середовища, які характеризуються вектором вхідних змінних (склад і температура фаз, тиск, швидкість, густина та ін.), які зазнають цілеспрямованих фізико-хімічних перетворень, можна записати

$$Y = A(U), \quad (1.17)$$

де A — оператор (технічний), який формалізує відображення простору змінних входу в простір виходу, відповідно до реального фізико-технічного процесу.

Оператор A є складним: відповідно до суперпозиції (накладання) ряду «елементарних» технологічних операторів — хімічного та фазового перетворень; дифузійного, конвективного й турбулентного перенесення речовини і теплоти; змішування тощо. Таким чином, цей оператор відображає сукупність лінійних, нелінійних, розподілених у просторі та змінних у часі процесів і має змішану детерміновано-стохастичну природу.

Якщо йдеться про математичну модель, то на основі виразу (1.17) записують

$$\hat{y} = \Phi(U, X), \quad (1.18)$$

де \hat{y} — простір оцінок змінних виходу.

Застосування методології системного підходу до створення складних систем керування. *Методологія* — сукупність способів дослідження в науці.

Під час створення складних структур керування системний підхід проявляється в таких підходах:

1. Будь-яка система на першому етапі розглядається з урахуванням лише формальних зв'язків між різними факторами та оцінювання характеру їхньої зміни під впливом зовнішніх умов. Об'єктом досліджень теорії систем є не фізична реальність, а загальні властивості та зв'язки між різними факторами. Зі зростанням складності систем керування для аналізу та синтезу їх слід застосовувати знання з різних наук.

2. Система завжди досліджується в умовах невизначеності (мети, характеристик зовнішнього середовища та поведінки оператора). У системі важливо забезпечити адаптацію та можливість розвитку.

3. Складність систем керування, їхня інформаційна потужність потребують залучення деяких спеціальних способів, наприклад декомпозиції та агрегування.

4. У складних системах керування завжди використовуються структурні перетворення.

5. У загальній теорії систем слід використовувати терміни, методи, поняття та способи, які є зрозумілими для інших наукових дисциплін (наприклад, інформатика та автоматика).

6. У теорії систем застосовують уніфіковані поняття, які дають можливість схарактеризувати як систему будь-якої складності, так і будь-яку її частину.

Системний підхід до створення автоматизованих технологічних комплексів (АТК) та комп'ютерно-інтегрованих систем керування (КІСК). За основними ознаками АТК та КІСК — складні системи, тому під час розв'язування задач аналізу та синтезу використовують методи та способи системного аналізу: визначення ієрархій, застосування методів декомпозиції та агрегування. Об'єктом для складних систем керування є технологічний комплекс, виробництво чи підприємство у цілому. В цьому разі розглядають рівні ієрархії, зокрема типовий технологічний процес, дільницю, цех, виробництво (завод), підприємство.

Автоматизований технологічний комплекс охоплює дві основні частини: об'єкт і систему керування. Особливістю системного підходу є формування структури та характеристик об'єкта, а також синтез системи керування для сформованого

об'єкта. Це стосується комплексу задач, зокрема виділення підсистем, визначення точок-джерел інформації, керувальних дій, оцінювання якості процесу функціонування тощо.

Узагальнений алгоритм розроблення АТК наведено на рис. 1.2. Зміст основних етапів умовно показано у вигляді послідовності дій. При цьому може бути різний ступінь деталізації на кожному етапі. Головна особливість системного підходу під час аналізу і синтезу складних систем — необхідність ітерацій, тобто повторення етапів, процедур та операцій з новими даними. На рисунку наявність ітерацій умовно показано стрілками, наприклад після оцінювання науково-технічного рівня АТК може виникнути необхідність повернутися на попередні етапи та уточнити критерії керування чи структуру АТК.



Рис. 1.2. Загальна структура процедур при створенні АТК

Аналогічний підхід використовують для аналізу та синтезу КІСК з урахуванням таких особливостей: визначення кількості та рівнів робочих місць, кількості й рівнів обчислювальних мереж. Ці задачі розглядаються в спеціальних дисциплінах.

Контрольні запитання і завдання

1. Чому системний аналіз взаємопов'язаний з іншими науковими дисциплінами?
2. В яких сферах діяльності людини використовуються методи системних досліджень?
3. Наведіть один із варіантів визначення терміна «системний аналіз»?
4. На яких принципах ґрунтується системний підхід?
5. Яке значення в системних дослідженнях мають процедури декомпозиції та агрегування? Наведіть приклад.
6. Дайте визначення та призначення процедур системного аналізу (цільового, ситуаційного, інформаційного, структурно-функціонального, техніко-економічного).
7. Чому в різних задачах використовуються різні визначення терміна «система»? Наведіть приклад.
8. Система в теоретико-множинному поданні.
9. Наведіть приклад взаємних відношень «система» — «підсистема» — «момент».
10. Як може подаватися система в символічній формі?
11. За якими ознаками класифікуються системи? Наведіть приклади.
12. Приклади закономірностей систем (цілісність, комунікативність, ієрархічність, історичність).
13. За якими ознаками класифікуються технологічні комплекси як складні системи?
14. Наведіть приклад системної задачі створення автоматизованих технологічних комплексів.

— 2 —

СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

2.1. Ієрархічні системи керування та їхні властивості

Ієрархія (від грец. Hierarchia, від hieros — священний та arche — влада) — розташування частин і елементів цілого в порядку від вищого до нижчого. Термін «ієрархія» у другий половині V ст. ввів афінський єпископ Діонісій Ареопагіт у трактатах «Про небесну ієрархію» і «Про церковну ієрархію». До XIX ст. цей термін використовувався для характеристики організації християнської церкви. В науці поняття «ієрархія» почали розробляти з другої половини XIX ст. і вживали для опису класового поділу суспільства та характеристики влади, особливо бюрократії. У XX ст. з виникненням теорії систем поняття «ієрархія» почали застосовувати для опису системних об'єктів різної природи. Зазначалося, що ієрархічно організовані структури існують в об'єктивній реальності: неорганічній, біологічній, соціальній.

У загальній теорії організації ієрархія характеризує принцип керування, який забезпечує ефективність функціонування систем, ієрархічна структура може описуватись ієрархічним графом («деревом»). В ієрархічній структурі функції керування розподіляються між рівнями, тобто сукупно підлеглими частинами. При цьому сигнали з верхніх рівнів є завданнями для нижніх, а інформація з нижніх рівнів передається на верхні й характеризує собою стан виконання завдань.

Для багаторівневої ієрархічної структури найістотнішими особливостями є:

- вертикальна супідрядність;
- право втручання;
- взаємозалежність дій.

Вертикальна супідрядність (рис. 2.1) означає, що будь-яка ієрархія складається з вертикально розташованих підсистем, які взаємодіють між собою (вертикальна декомпозиція) і становлять конкретну систему.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	17
1.1. Визначення системного аналізу	17
1.2. Процедури системного аналізу.....	22
1.3. Визначення систем.....	25
1.4. Класифікація систем	31
1.5. Закономірності великих (складних) систем	35
1.6. Системний підхід до аналізу технологічних комплексів	38
<i>Контрольні запитання і завдання</i>	<i>44</i>
2. СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ СИСТЕМ.....	45
2.1. Ієрархічні системи керування та їхні властивості	45
2.2. Функціональна, організаційна і технічна структури ...	52
2.3. Формалізація опису структури системи на основі графових моделей.....	54
2.4. Структурний аналіз об'єкта.....	64
2.5. Моделювання технічної структури складних систем керування	66
2.6. Декомпозиція технічної структури складних систем керування	69
<i>Контрольні запитання і завдання</i>	<i>70</i>
3. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ	71
3.1. Класи задач і види керування.....	71
3.2. Типові функціональні структури систем керування ...	72
3.3. Системна задача сценарно-цільового керування складними об'єктами.....	83
<i>Контрольні запитання і завдання</i>	<i>109</i>

4. РОЗВ'ЯЗУВАННЯ СИСТЕМНИХ ЗАДАЧ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДОЛОГІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН.....	111
4.1. Формалізація та перероблення якісної інформації. Нечіткі множини	111
4.2. Функції належності.....	120
4.3. Принципи і структура системи керування з нечітким регулятором	126
4.4. Приклад реалізації системи оцінювання.....	130
<i>Контрольні запитання і завдання</i>	<i>131</i>
5. СИСТЕМНА ЗАДАЧА КООРДИНАЦІЇ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ.....	132
5.1. Постановка задачі координації у дворівневій структурі	132
5.2. Особливості координації в керуванні багаторівневими ієрархічними системами	134
5.3. Координація нечітких рішень у багаторівневій ієрархічній системі.....	138
5.4. Координація функціонування підсистем технологічного комплексу.....	149
5.5. Побудова і розв'язування алгоритмів координації.....	153
<i>Контрольні запитання і завдання</i>	<i>159</i>
6. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	160
6.1. Методи опису процесу функціонування систем	160
6.2. Формальний опис процесу функціонування складних систем керування.....	161
6.3. Опис процесу функціонування ієрархічної системи керування технологічного комплексу	164
6.4. Агрегативні моделі функціонування складних систем керування	168
<i>Контрольні запитання і завдання</i>	<i>172</i>
7. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМНИХ ЗАДАЧ.....	173
7.1. Інформація у задачах керування.....	173
7.2. Аналіз якісних властивостей інформації.....	175
7.3. Характеристики інформованості осіб, які приймають рішення	177

7.4. Класифікація та визначення видів інформації в складних системах керування	179
7.5. Ентропія та її зміни в складних системах.....	183
7.6. Ентропійно-інформаційні співвідношення процесу керування	187
<i>Контрольні запитання і завдання</i>	<i>191</i>
8. ВИКОРИСТАННЯ У СИСТЕМНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ЗНАНЬ І ДОСВІДУ СПЕЦІАЛІСТІВ.....	193
8.1. Методи вироблення колективних рішень	193
8.2. Методи структурування проблеми.....	194
8.3. Методи експертних оцінювань	195
8.4. Методи організації складних експертиз	199
8.5. Експертне оцінювання.....	204
<i>Контрольні запитання і завдання</i>	<i>211</i>
9. ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ	212
9.1. Проблема вибору і прийняття рішень	212
9.2. Моделі прийняття рішень у складних системах керування.....	216
9.3. Системи підтримки прийняття рішень	226
<i>Контрольні запитання і завдання</i>	<i>242</i>
10. СИНТЕЗ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	243
10.1. Постановка задачі. Методи архітектурного і системотехнічного синтезу	243
10.2. Синтез оптимальної технічної структури системи керування	246
10.3. Застосування штучних нейронних мереж у системах керування	251
10.4. Методи реінжинірингу у створенні складних систем керування	261
10.5. Методи дослідження операцій у системному аналізі	263
10.6. Розв'язування задач ідентифікації поведінки складних систем	266
<i>Контрольні запитання і завдання</i>	<i>270</i>
ЛІТЕРАТУРА	271

Навчальне видання

Ладанюк Анатолій Петрович
Смітюх Ярослав Володимирович
Власенко Лідія Олександрівна
Заєць Наталія Анатоліївна
Ельперін Ігор Володимирович

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Редактор *Л.М. Орішич*
Художнє оформлення *Є.В. Чурія*
Комп'ютерна верстка *Л.В. Різніченко*