

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**Є. Г. Пономаренко, О. С. Ломакіна**

**МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ТА ПРОЦЕСІВ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів 1 та 2 курсів усіх форм навчання першого (бакалаврського)  
рівня спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2020**

**Пономаренко Є. Г.** Методи аналізу екологічних систем та процесів : конспект лекцій для студентів 1 та 2 курсів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища / Є. Г. Пономаренко, О. С. Ломакіна ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 41 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. Є. Г. Пономаренко

ст. викл. О. С. Ломакіна

Рецензент

**Ф. В. Стольберг**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерної екології міст (Харківський національний університет імені О. М. Бекетова)

*Рекомендовано кафедрою інженерної екології міст, протокол № 1 від 28.08.19.*

© Є. Г. Пономаренко, О. С. Ломакіна, 2020

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Основи системного підходу до аналізу екосистем та процесів.....	5
1.1 Системи та їх властивості.....	5
1.2 Системний аналіз та системний підхід.....	9
1.3 Етапи системного аналізу.....	13
2 Методологія системного аналізу екологічних систем та процесів.....	19
2.1 Принципи визначення завдань та формулювання цілей системного аналізу.....	19
2.2 Підходи до моделювання екологічних систем та процесів.....	29
2.3 Методологія виробітки та оцінки можливих стратегій.....	36
Список використаних джерел .....	40

## ВСТУП

Навчальна дисципліна «Методи аналізу екологічних систем та процесів» має на меті формування у майбутніх фахівців теоретичних знань та практичних навичок з аналізу складних екологічних систем та процесів, а також сприяння формуванню аналітичних властивостей та системного мислення.

Завданням дисципліни є оволодіння студентами базовими знаннями з методології системного аналізу екологічних процесів, критеріїв та методів оцінки складних систем і процесів, методами управління системами та критеріями оцінки управлінських рішень

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен:

– знати: основні поняття та положення теорії систем, основи системного підходу до розв'язання складних проблем, методи моделювання систем, методи управління;

– уміти: виконувати структурний аналіз систем, визначати можливі шляхи та напрями розв'язання проблем, визначати критерії оцінки управлінських рішень, будувати моделі простих систем.

# 1 ОСНОВИ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ДО АНАЛІЗУ ЕКОСИСТЕМ ТА ПРОЦЕСІВ

## 1.1 Системи та їх властивості

Сучасна екологія є вченням про екосистеми – закономірності їх складу, структури, функціонування та еволюції. Екологічні системи є окремим випадком більш загального поняття «система», що є основним об'єктом вивчення наукової дисципліни «системний аналіз». Таким чином, аналіз екосистем може розглядатися, як одна із задач системного аналізу з використанням притаманних цьому методу визначень, методів та підходів.

Наразі поняття «система» ще не набуло загальноприйнятого значення. У нашому курсі ми будемо виходити з визначення, що надав засновник системного підходу, австрійський учений Людвіг фон Берталанфі.

Система – це комплекс елементів, що взаємодіють між собою та довкіллям.

Система складається з елементів. Елемент системи – це складова частина системи, яку розглядають як неподільну. Поняття неподільності є умовним і залежить від цілі системи. Наприклад, розглядаючи екосистему, достатньо виділити в якості елементів види організмів і немає потреби враховувати кожен особину. Тобто склад і кількість елементів залежить від того, для чого необхідна система, тобто від цілі функціонування системи.

Елементи мають взаємодіяти між собою. Взаємодія між елементами існує у тому випадку, якщо між ними відбувається передача енергії, інформації або речовини. Таким чином, визначення взаємозв'язку між елементами – це визначення того, що передається. Взаємозв'язок між елементами системи може бути однонаправленим або двостороннім.

Елементи системи з зв'язками між ними утворюють структуру системи. Саме структура визначає властивості системи. Якщо елементи відповідають на

питання «З чого складається система?», то структура визначає «Як улаштована система».

Мета системи – це її виходи. Система може мати один чи декілька виходів. Саме виходи системи визначають її структуру. Можна сказати, що елементи поєднуються і функціонують заради досягнення цілі. Включення того чи іншого елемента до складу системи визначається тим, чи чинить він прямий або непрямий (через інші елементи) вплив на хоча б один з виходів системи. Таким чином склад системи і зв'язок між елементами визначаються її виходами. З цього приводу цілі системи іноді визначають як головний системоутворюючий фактор.

Практично корисні системи повинні мати зв'язок з оточуючим середовищем (хоча деякі визначення систем не потребують такої властивості). Ця необхідність впливає саме з потреб практики, тому що без такого зв'язку система буде неспостережувана і некерована. Тому окрім елементів та виходів до складу системи також входять:

- межа системи (може бути як фізична, так і «віртуальна»);
- вхідні (зовнішні) впливи (поділяються на такі, що можуть керуватися, тобто такі, які можна змінювати, та такі, що можуть тільки спостерігатися, тобто такі, які можуть контролюватися, але не можуть бути змінені).

Між виходом системи і її входом також може існувати зв'язок. Такий зв'язок називають зворотним. Зворотний зв'язок, що зменшує вплив входів на вихід називають негативним, а зворотний зв'язок, що збільшує вплив входів на вихід називають позитивним.

Ще раз підкреслимо, що вибір елементів визначається цілями системи. Для конкретної системи елемент є найменшою (неподільною) часткою системи. Але при зміні цілі елемент сам може розглядатися як система. Наприклад кожен вид (елемент екосистеми) може розглядатися як система, де елементами будуть особини, кожна особина може розглядатися як система, де елементами будуть її органи і так далі. Тобто поняття елемента є відносним. Кожен елемент може

розглядатися як система більш низького рівня, а кожна система в свою чергу може бути елементом системи більш високого рівня.

Підсумовуючи, можна сказати що:

- система являє собою цілісний комплекс взаємозв'язаних елементів;
- система утворює єдність із середовищем;
- системи, можуть бути є елементами систем більш високого рівня;
- елементи будь-якої системи можуть бути системами більш низького рівня.

Скласти систему – це означає визначити виходи та входи системи, її межі, елементи та зв'язки між елементами (рис. 1.1). У разі, якщо група елементів виконує подібні функції, вони можуть бути об'єднані у підсистему.

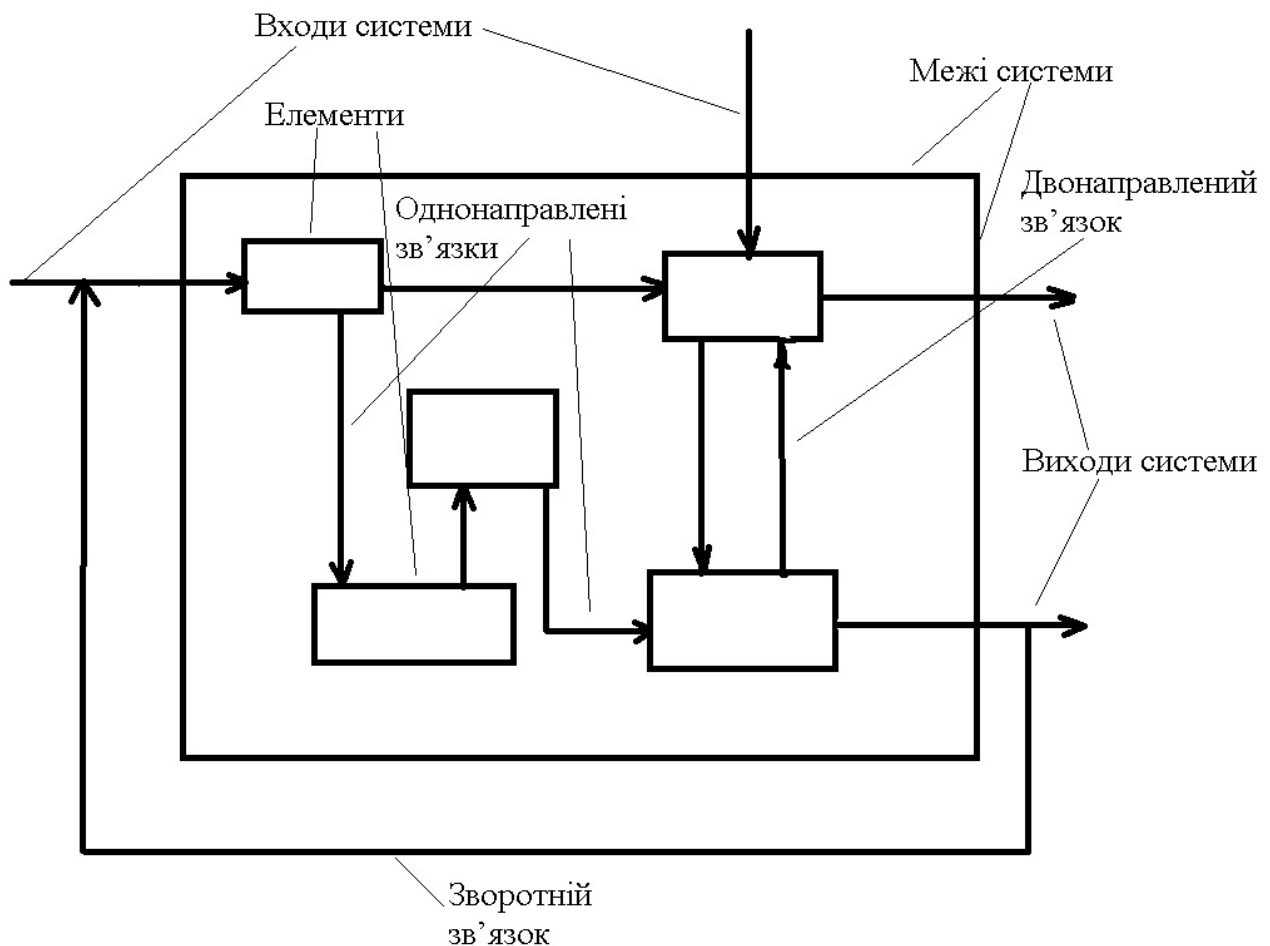


Рисунок 1.1 – Структура та складові системи

Властивості системи:

– цілісність (емергентність) системи полягає у твердженні, що загальні властивості системи в цілому не дорівнюють сумі властивостей її елементів. Таким чином, поєднання цих елементів у межах однієї системи утворює нові властивості, які є відсутніми у окремих елементів. У тому разі, якщо ми зруйнуємо цілісну систему, її елементи перестануть відігравати ту роль, яку вони виконували у системі;

– обмеженість системи полягає у тому, що кожна система має межі;

– структурність системи полягає у тому, що властивості системи залежать не тільки від складу елементів, а й від того, яким чином вони поєднані один з одним, тобто послідовність з'єднання елементів визначає властивості системи;

– ієрархічність системи визначає рівні значущості елементів (їх підпорядкованість). Підпорядкованість елементів залежить від мети, а зв'язки між елементами визначають властивості та функціонування системи;

– саморозвиток системи визначається здатністю системи адекватно реагувати на зовнішні впливи, пристосовувати до змін (адаптуватися). Ця властивість здебільшого не стосується технічних систем.

Стан системи – це збереження незмінних структури та зв'язків. Характеристики системи описують стан системи за певний проміжок часу і є незмінними у цей період часу.

Поведінка системи – це перехід з одного стану у інший. У тому разі, коли відсутні зовнішні впливи, система не змінює свого стану. Її структура при цьому також не змінюється.

Розвиток системи – це зміни в структурі системи (заміна елементів або зміна зв'язків, що впливає на зміну виходу з системи). Слід замітити, що розвиток системи може бути як позитивний (покращення) так і негативний (деградація).



## 1.2 Системний аналіз та системний підхід

Системний аналіз як дисципліна сформувався в результаті виникнення необхідності досліджувати і проектувати складні системи, управляти ними в умовах неповноти інформації, обмеженості ресурсів і дефіциту часу.

Системний аналіз – це міждисциплінарний курс, що узагальнює методологію дослідження складних технічних, природних і соціальних систем.

Основною задачею системного аналізу є пошук вирішення складних проблем. Системний аналіз повинен допомогти ОПР – особі, що приймає рішення – обрати найкраще рішення складної проблеми. Важливо підкреслити, що саме ОПР приймає рішення по використанню результатів системного аналізу. Цей принцип діє незалежно від складності задачі чи предметної області (галузі народного господарства, політичної системи, державного устрою та інше).

Стосовно до задач дослідження, проектування і управління складними системами, проблема прийняття рішення пов'язана з вибором певної альтернативи в умовах різного роду невизначеностей.

Невизначеності обумовлюються:

- багатокритеріальністю задач;
- невизначеністю цілей розвитку систем;
- неоднозначністю сценаріїв розвитку системи;
- недостатністю апріорної інформації про систему;
- впливом випадкових факторів у ході динамічного розвитку системи та іншими умовами.

Враховуючи дані обставини, системний аналіз можна визначити як дисципліну, що займається проблемами прийняття рішень в умовах, коли вибір альтернативи вимагає аналізу складної інформації різної фізичної природи. Базовим припущенням системного аналізу є уявлення про світ, як ієрархічну сукупність систем.

Найбільш істотним принципом системного аналізу є принцип кінцевої цілі. Він відображає абсолютний пріоритет кінцевої (глобальної) цілі. Це означає, що для проведення системного аналізу необхідно в першу чергу сформулювати ціль дослідження. Розпливчасті, не повністю визначені цілі спричиняють невірні висновки. Аналіз слід проводити на базі першочергового з'ясування основної цілі системи, що досліджується. Це дозволить визначити її основні суттєві властивості, показники якості та критерії оцінки.

Системний аналіз базується на системному підході. Системний підхід полягає в тому, що кожний більш-менш складний об'єкт розглядається в якості самостійної системи зі своїми особливостями функціонування і розвитку. Грунтуючись на ідеях цілісності і відносної незалежності об'єктів, що перебувають у цілісному світі, принцип системності передбачає представлення досліджуваного об'єкта як деякої системи.

Природа – це система, якій характерні структурно-функціональна єдність взаємозв'язаних компонентів і цілісність біотичної та абіотичної складових. Біотична складова навколишнього середовища об'єднується у біосферу (глобальну екосистему), що складається з ієрархічно пов'язаних між собою екосистем різних рівнів організації і великої кількості різноманітних підсистем, між якими існують тісні матеріально-енергетичні та ієрархічні зв'язки.

Ієрархічність будови біосфери зумовлює й ієрархічність систем регуляції рівноваги (гомеостазу) її підсистем. Гомеостатичні системи мають генетичну природу й еволюціонують разом зі структурно-функціональною організацією екосистем. Таким чином, життя не існує поза екосистемами, тому вивчення природних об'єктів будь-якого таксономічного рівня ефективно лише при застосуванні системного підходу.

Розглянемо основні принципи системного підходу:

– перший принцип – системний підхід пов'язаний з дослідженням і створенням об'єктів, як систем, і відноситься тільки до систем, тобто розглядає сукупність елементів системи як одне ціле (принцип цілісності).

– другий принцип – це визнання того, що властивості системи це не просто сума властивостей її елементів. Тим самим постулюється можливість того, що система має особливі властивості, яких може і не бути у окремих елементів (принцип емергентності);

– третій принцип системного підходу визначає ієрархічність пізнання, що вимагає багаторівневого вивчення предмета, а саме: вивчення самого предмета – «власний» рівень; вивчення цього ж предмета як елемента більш широкої системи – «вищий» рівень і, нарешті, вивчення цього предмета в співвідношенні з елементами, що складають даний предмет, – «нижчий» рівень. Інакше кажучи, повинна існувати наявність множини (принаймні, двох) елементів, розташованих на основі підпорядкування елементів нижчого рівня елементам вищого рівня. Реалізація цього принципу добре видна на прикладі будь-якої конкретної організації. Як відомо, будь-яка організація являє собою взаємодію двох підсистем: керуючої і керованої. Одна підпорядковується іншій. Цей принцип системного підходу вимагає вивчення інтегративних властивостей і закономірностей систем та комплексів систем, розкриття базисних механізмів інтеграції цілого (принцип ієрархічності);

– четвертий принцип системного підходу – його націленість на одержання кількісних характеристик, створення методів, що звужують неоднозначність понять, визначень, оцінок;

– п'ятий принцип – націленість системного підходу на ефективність системи управління. Теоретично доведене, що завжди існує функція цінності системи – у вигляді залежності її ефективності (здебільшого це економічний показник) від умов побудови і функціонування;

– шостий принцип полягає у використанні множини різних форм опису окремих елементів і системи в цілому (принцип множинності);

– сьомий принцип – система розглядається в русі і розвитку (принцип динамічності).

Інакше кажучи, системний підхід вимагає розглядати проблему не ізольовано, а в єдності зв'язків з навколишнім середовищем, розуміти сутність

кожного зв'язку і окремого елемента, проводити асоціації між загальними і приватними цілями. Усе це формує особливий метод мислення, що дозволяє гнучко реагувати на зміни обстановки і ухвалювати обґрунтовані рішення.

Системні підхід включає наступні компоненти:

– системно-комплексний, що полягає у виявленні елементів, що складають дану систему;

– системно-структурний, що полягає в з'ясуванні внутрішніх зв'язків і залежностей між елементами даної системи, що і дозволяє отримати уявлення про внутрішню організацію (побудову) об'єкта, що досліджується;

– системно-функціональний, що передбачає виявлення функцій, для виконання яких створені і існують відповідні об'єкти;

– системно-цільовий, що означає необхідність визначення цілей дослідження, їх взаємного зв'язування між собою;

– системно-ресурсний, що полягає в ретельному виявленні ресурсів, що потрібні для вирішення тієї або іншої проблеми;

– системно-інтеграційний, що полягає у визначенні сукупності якісних властивостей системи, що забезпечують її цілісність і особливість;

– системно-комунікаційний, що означає необхідність виявлення зовнішніх зв'язків даного об'єкта з іншими, тобто, його зв'язків з навколишнім середовищем;

– системно-історичний, що дозволяє з'ясувати умови в часі виникнення досліджуваного об'єкта, пройдені ним етапи розвитку, сучасний стан, а також можливі перспективи розвитку.

Результатом системного аналізу є вибір із множини альтернатив тієї, яка найкращим чином задовольняє умовам поставленої задачі. Вибір альтернативи, зроблений на основі системного аналізу, дозволяє системі розвиватися найкращим образом, раціонально розподіляти й витратити ресурси, а також формувати передумови для свого подальшого розвитку і подальшого здійснення основних функцій системи.

### 1.3 Етапи системного аналізу

Приходячи до системного аналітика зі своєю проблемою, яку не зміг розв'язати сам, клієнт ініціює процедуру аналізу. Перехід зі стану проблемної ситуації в стан бажаної кінцевої цілі – рішення проблеми – повинен здійснюватися упорядковано, шляхом послідовного виконання певних кроків. При цьому кожний крок теж має свій алгоритм, порушення якого може негативно вплинути на результату цього етапу і, отже, усього процесу в цілому. Крім того, на кожному етапі існує небезпека зробити помилку, тому необхідно знати про типові помилки, щоб їх уникнути.

У практиці системного аналізу кінцевий результат заздалегідь нікому не відомий. Він буде поступово формуватися в ході аналізу, тому задачі, у яких заздалегідь сформульоване те, що повинне вийти в результаті роботи, і задачі, у яких необхідно обґрунтувати кимось уже ухвалені рішення, не є задачами системного аналізу.

Послідовність рішення конкретної проблеми майже ніколи не буває лінійною, у ній будуть міститися цикли і повернення, оскільки на наступних етапах аналізу може виявитися неповна завершеність або погрішність якогось із попередніх етапів; отже буде потрібно повернутися до нього та виправити виявлений недолік, знову проходячи вже пройдені етапи. При цьому потрібно розуміти, що практично будь-яка задача системного аналізу має кілька варіантів рішення. Підкреслимо, що серед можливих варіантів рішення задачі необхідно розглядати тільки ті, які реалізують так зване поліпшуюче втручання – таку зміну проблемної ситуації, яка позитивно оцінюється хоча б одним з її учасників і не негативно – усіма іншими.

На думку американського вченого в області теорії систем Річарда Акоффа існує всього чотири способи рішення проблем:

– невтручання (absolution) – припускає, що природній хід подій приведе до вирішення проблеми. Така поведінка має сенс, якщо будь-які пропонувані втручання приводять до гірших результатів, чім невтручання;

– часткове втручання (resolution) – дія, що знижує незадоволеність, послабляє гостроту проблеми, але не усуває її повністю. Звичайно цей спосіб застосовується при дефіциті ресурсів, що не дозволяє повністю вирішити проблему;

– найкраще в заданих умовах втручання (solution);

– повне зникнення проблеми і відсутність у подальшому нових проблем (dissolution – розчинення). Важливим варіантом «розчинення» проблеми є її попередження, вживання заходів для того, щоб вона не з'явилася. У цьому випадку зміна системи проводиться не після появи проблеми з метою її вирішення, а до того – з метою її запобігання.

Для успішного вирішення задачі є необхідними такі передумови:

– доступ до будь-якої необхідної інформації;

– особиста участь обов'язкових учасників проблемної ситуації;

– відмова від вимоги заздалегідь сформулювати необхідний результат.

Послідовність, кількість і зміст етапів системного аналізу не є строго зафіксованими. Тому ми розглянемо один з можливих варіантів послідовності дій, що приводять до досягнення цілі процедури системного аналізу – наданню ОНР (особі, що приймає рішення) варіантів рішення складної проблеми:

I етап. Виявлення проблем та постановка цілей.

Цей етап включає такі підетапи:

а) вибір проблеми.

На цьому етапі приймається рішення про необхідність застосування процедури системного аналізу. Розуміння того, що проблема досить важлива і складна для детального вивчення за допомогою системного аналізу не завжди виявляється простим. Складність проблеми не в останню чергу залежить від

кількості наявних невизначеностей. До них відносять невизначеності вихідної інформації, невизначеність цілей і невизначеність наслідків рішень.

Невизначеності вихідної інформації можуть бути стохастичними і нестохастичними.

Невизначеність цілей є наслідком багатокритеріальності задач системного аналізу. Задачі з багатьма критеріями характерні для великих технічних, господарських, екологічних проектів, причому в багатьох випадках критерії бувають суперечливі між собою. Формалізація цілі, яку повинна переслідувати задача системного аналізу – найважкіша частина і один з головних моментів. Навіть можна сказати, що ціль є самостійним об'єктом дослідження.

Нарешті, існують невизначеності, пов'язані з наступним впливом результатів прийнятого рішення на проблемну ситуацію. Рішення приймається для того, щоб вирішити проблемну ситуацію. Однак оскільки рішення приймається для складної системи, то розвиток системи в часі може мати безліч стратегій. І звичайно на етапі формування рішення й прийняття управляючого впливу аналітики можуть не уявляти собі повної картини розвитку ситуації в подальшому;

б) фіксація проблеми.

Завдання цього етапу – сформулювати проблему і зафіксувати її документально. Фіксація проблеми є лише відправною точкою, початком системного дослідження, а не готовим формулюванням проблеми, що підлягає негайному вирішенню. Проблема існує тому, що учасник проблемної ситуації не зміг її вирішити, тобто його уявлення про сутність проблеми не є повним. Тому він може висвітлити тільки якийсь один бік проблеми. В реальності, саме неповнота уявлення про проблемну ситуацію є однією з причин, що породжують проблему. Саме на збір додаткової інформації і розширенню уявлення про проблемну ситуацію присвячені подальші кроки системного аналізу;

в) діагностика проблеми.

У практиці системного аналізу спочатку сформульовані цілі по мірі виконання аналізу часто змінюються або відмінюються зовсім. Це викликане тим, що суб'єкт, цілі якого повинні бути виявлені, звичайно сам не може їх чітко усвідомити, навіть якщо і дає їм чіткі формулювання. Дійсні цілі, як правило, ширше, чим оголошені.

Особливу увагу необхідно приділити початковим умовам, тобто тим припущенням, які накладають обмеження на поставлену задачу. Число факторів, що враховуються, слід зменшити, щоб звести її до виду, що допускає реальну можливість рішення, тобто на цьому етапі необхідно зменшити складність задачі, що розв'язується шляхом відкидання другорядних факторів. Крім того, ніяка система не є ізольованою (третій принцип системного аналізу). Тому необхідно виявити ті підсистеми і надсистеми, що пов'язані з системою, що вивчається.

Крім того, до проблемної ситуації як правило причетне коло осіб, інтереси яких мають бути враховані (рішення має бути поліпшуючим), а це неминуче призводить до розширення і уточнення первісного формулювання проблеми;

г) складання списку стейк-холдерів.

Для того щоб згодом урахувати інтереси всіх учасників проблемної ситуації (а саме на цьому засноване поняття поліпшуючого втручання), необхідно спочатку виявити, хто залучений у проблемну ситуацію і скласти їх список. Усіх безпосередніх учасників проблемної ситуації називають стейк-холдерами. Принципи їх визначення розглянуті у наступних лекціях;

д) виявлення проблемного місива.

На цьому етапі кожний стейк-холдер формулює своє видіння проблеми. Отриманий перелік суб'єктивних оцінок існуючої реальності Р. Акофф назвав проблемним місивом (problem mess).



II етап. Цілевиявлення і розробка моделей прийняття рішень.

Цей етап включає такі підетапи:

а) визначення конфігуратора.

Реальні проблеми, як правило, не бувають однодисциплінарними, а вимагають участі фахівців різних профілів. Кожна професія має свою професійну мову, за допомогою якої вона описує реальні ситуації. Мінімальний набір професійних мов, що дозволяє надати повний (адекватний) опис проблемної ситуації і її перетворень, називається конфігуратором. Уся робота в ході рішення проблеми буде відбуватися на мовах конфігуратора. Цей етап необхідний для того, щоб усі причетні до проблеми особи могли розуміти один одного;

б) цілевиявлення.

Наше завдання – знайти таке рішення проблем, яке реалізує непогіршуюче втручання. Це означає, що жоден зі стейк-холдерів не повинен оцінювати рішення негативно, і хоча б один – позитивно. Люди дають позитивну оцінку зміні, якщо вона наближає їх до цілі, і негативну – якщо віддаляє від неї. Отже, для проектування втручання необхідно знати цілі всіх стейк-холдерів, отримавши в такий спосіб цільовий масив. При цьому необхідно мати на увазі, що цілі в проблемному масиві можуть бути суперечливими. У задачу системного аналізу входить узгодження цих цілей і пошук компромісів;

в) визначення критеріїв.

У процесі вирішення проблеми необхідно порівнювати запропоновані варіанти рішення, оцінювати ступінь досягнення цілі або відхилення від неї. Для цього необхідно виділення деяких ознак порівняння, які називають критеріями. Критерії переводять якісний опис цілей у кількісну оцінку їх досягнення. Вони повинні бути доступними для спостереження і виміру;

д) побудова і удосконалення моделей.

Це найбільш трудомісткий і критичний стосовно результату етап системного аналізу. Він починається з побудови структури системи і полягає у

виявленні і кількісній оцінці взаємозв'язків. Цей етап буде докладно розглянутий у наступній темі.

III етап. Оцінка альтернатив та пошук рішення.

Цей етап складається з таких підетапів:

а) генерування альтернатив.

На цьому етапі генеруються варіанти рішення задач (альтернативи), що реалізують непогіршуюче втручання. Існують дві загальні форми альтернатив: функціонально різні альтернативи (різниця у вигляді) або операційно різні альтернативи (різниця в ступені). Функціональні альтернативи відрізняються засобами рішення задач. Операційні альтернативи відрізняються способами, за якими об'єкти, властивості і зв'язки агрегуються в систему;

б) вибір або ухвалення рішення.

На основі отриманих у ході попередніх етапів системного аналізу множини альтернатив, цілей, заради досягнення яких проводиться вибір, критеріїв порівняння альтернатив, ОПР здійснює вибір рішення (поліпшуючого впливу).

## **2 МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ТА ПРОЦЕСІВ**

### **2.1 Принципи визначення завдань та формулювання цілей системного аналізу**

Визначення завдання – перетворення неясно сформульованої проблеми в структуровану форму. Це здійснюється шляхом декомпозиції проблеми, розкладання її на взаємозалежний комплекс підпроблем, уточненням кожної з них до ступеня постановки задачі: «дано–потрібно –визначити».

Визначення завдання починається з аналізу проблеми. На цьому етапі необхідно з'ясувати таке:

- чи існує проблема;
- скласти точне формулювання проблеми;
- провести аналіз логічної структури проблеми;
- виявити зв'язки проблеми з іншими проблемами;
- оцінити принципову можливість розв'язання проблеми.

Постановка формальної задачі, яку треба вирішувати, для традиційних наук – початковий, відправний етап роботи. У дослідженні ж або проектуванні складної системи це проміжний результат, якому передують тривала кропітка й складна робота зі структурування вихідної проблеми.

Необхідність системного аналізу виникає тоді, коли проблема вже не тільки існує, але й вимагає вирішення, коли ініціатор системного аналізу («замовник») вже сформулював свою проблему. Системний аналітик знає, що початкове формулювання – лише дуже приблизний натяк на те, яким саме повинне бути дійсне робоче формулювання проблеми.

Є низка причин вважати будь-яке вихідне формулювання проблеми лише «нульовим наближенням». Головна з них полягає в тому, що проблемовмісна система не є ні ізольованою, ні монолітною – вона пов'язана з іншими системами й входить як частина в деяку надсистему; сама вона у свою чергу

складається із частин, підсистем, з різним ступенем причетних до даної проблеми. Якщо це дійсно реальна проблема, то необхідно враховувати, як це позначиться на тих, кого неминуче торкнуться плановані зміни.

Таким чином, до будь-якої реальної проблеми необхідно апріорі відноситися не як до окремо взятої, а як до «клубку» взаємозалежних проблем. Використовуючи для позначення цієї сукупності термін «проблематика», можна сказати, що етап формулювання проблеми полягає у визначенні проблематики.

Інша важлива причина того, щоб відноситися до початкового формулювання проблеми не як до безумовної відправної точки подальшого аналізу, а як до початкового об'єкта, що сам підлягає вивченню й уточненню, є той факт, що запропоноване замовником формулювання є його моделлю реальної проблемної ситуації. Звідси випливає, що необхідно враховувати не тільки точку зору замовника, позиції інших зацікавлених сторін але й те, що його модель, як і всяка інша, неминуче має цільовий характер, є приблизною та спрощеною. Тому слід перевіряти запропоноване формулювання на адекватність, що звичайно приводить до розвитку, доповнення, уточнення початкового варіанту опису проблеми.

Для виявлення позицій інших зацікавлених сторін необхідно спочатку дізнатися, хто ж залучений у проблемну ситуацію. Усіх прямих, безпосередніх учасників проблемної ситуації називають «стейк-холдери».

По-перше, стейк-холдери мають бути джерелами необхідної інформації, що потрібна для уточнення ситуації. Тобто, в першу чергу вони можуть допомогти виявити проблеми, яких не бачить замовник. Але їхніх знань і досвіду може не вистачити для виробітки покращуючого втручання. Тому є доцільним долучати до розгляду проблеми професіоналів-експертів. Хоча їх участь стане потрібною на більш пізніх етапах і, строго кажучи, вони не є стейк-холдерами, але про їх участь у процедурі системного аналізу треба потурбуватися заздалегідь. Крім того, при вирішенні проблем завжди існують ті, в чий інтерес вирішується ситуація, і ті, за чий рахунок вона вирішується.

Перших називають «проблемовміщуючими» стейк-холдерами, а других – «проблемовирішуючими».

Таким чином, виходячи з необхідності прийняття покращуючого рішення, до переліку стейк-холдерів рекомендується включати:

- замовника, тобто того, хто ставить проблему, замовляє й оплачує системний аналіз;

- осіб, що приймають рішення, тобто тих, від повноважень яких безпосередньо залежить рішення проблеми;

- учасників, як активних, тобто тих, чії дії будуть потрібні при рішенні проблеми, так і пасивних – тих, на кому позначається (позитивним або негативним чином) наслідки рішення проблеми;

- самого системного аналітика і його співробітників.

Для полегшення запам'ятовування груп осіб, яких доцільно залучати до вирішення проблеми, можна скористуватися російськомовним мнемонічним скороченням ПИРС – потребители, исполнители, руководители, собственники, тобто споживачі, виконавці, керівники і власники.

У такий спосіб у список стейк-холдерів будуть включені:

- потрібні вам учасники ситуації як експерти;

- представники проблеморозв'язуючих систем і проблемовмісних систем;

- ті, кого бажано мати помічником або союзником при вирішенні задачі;

- суб'єкти, юридично пов'язані із ситуацією;

- ті, на кого втручання може вплинути негативно.

Крім того рекомендується розширювати списки стейк-холдерів за рахунок обов'язкового включення трьох «безмовних» стейк-холдерів:

- майбутні покоління (їх ще немає, але їх інтереси необхідно врахувати, щоб не створити їм проблем нашим втручанням у сьогодишню реальність);

- минулі покоління (їх уже немає, але їх інтереси представлені залишеною нам культурою);

- навколишнє середовище.

Від стейк-холдерів в першу чергу потрібно отримати їх оцінку ситуації, що є проблемною для замовника. Ця множина суб'єктивних оцінок стейк-холдерів утворює так зване «проблемне місиво» (за визначенням Р. Акоффа). Принциповим є те, що кожний елемент цієї множини не є незалежним, а всі оцінки утворюють взаємодіючу суміш, тобто систему, що, як ми розглядали раніше, володіє властивістю неподільності. Це означає, що неможливо вирішувати одну якусь локальну проблему в відриві від інших. Проблема замовника таким чином стає тільки однією з проблем «проблемного місива». А «проблемне місиво» дає можливість пошуку покращуючого втручання з урахуванням інтересів стейк-холдерів.

Однією з проблем цього етапу є складність доступу до стейк-холдерів. Для її вирішення стейк-холдерів розділяють на обов'язкових і бажаних. До обов'язкових належать проблемовміщуючі і проблемовирішуючі стейк-холдери. Якщо в якості цих стейк-холдерів виступають організації, то обов'язковою є участь перших осіб (керівників) цих організацій. Без виконання цієї умови подальша робота не має сенсу.

Інші стейк-холдери є бажаними. Тобто, якщо їх неможливо долучити особисто, то можна спробувати отримати від них необхідну інформацію без особистого контакту, наприклад через посередників. Цей принцип безпосередньо стосується «безмовних» стейк-холдерів, представниками яких можуть бути експерти, вчені, керівники державних і громадських організацій. Якщо стейк-холдерами є групи людей (не плутати з організаціями), то треба або залучати авторитетного представника групи, або спиратися на соціологічні дослідження і статистику.

Опис будь-якої складної ситуації вимагає використання низки професійних мов з притаманною ним термінологією. Це породжує ситуацію «Вавилонської башти», коли люди різних спеціальностей не розуміють один одного. Тому в процесі системного аналізу треба передбачати необхідність витратити час і зусилля для вироблення спільного розуміння проблеми усіма членами групи.

Ідея вироблення покращуючого рішення припускає необхідність знання цілей стейк-холдерів. Це витікає з того факту, що рішення сприймається як негативне (а саме такі ситуації ми повинні оминати), якщо воно віддаляє стейк-холдера від його цілі. Тому на цьому етапі виникає потреба в роботі, аналогічній визначенню «проблемного місива». По аналогії можна назвати її формуванням «цільового місива». При цьому опитуючи стейк-холдерів і формуючи «цільове місиво» системний аналітик повинен розуміти, що на практиці може існувати різниця між цілями, що висловлюються і дійсними цілями. Основними причинами цього є (цілеспрямоване обдурювання не враховується):

- підміна цілей. Особисті цілі стейк-холдера не враховуються або навіть вступають в конфлікт з загальними цілями. Наприклад, при будівництві нової будівлі архітектор вважає ціллю її зовнішній вигляд і гармонію з довкілля, а не зручність і комфорт людей, що будуть в ній жити або працювати чи вчитися;

- змішування цілей і засобів. Виявити це можливо, задавши запитання «Для чого це вам потрібно?». Якщо у відповідь буде названа інша ціль більш низького рівня, то вона і є істиною ціллю;

- неповний перелік цілей. Приклади наслідків цього містять забавні історії з серії «правильно формулюйте технічне завдання», яких багато міститься в мережі Інтернет;

- неспроможність висловити ціль. В цьому випадку можливим підходом є запропонувати стейк-холдеру низку можливих цілей, щоб він мав змогу вибрати ту, яку він вважає найбільш близькою для нього. Іншим підходом може бути розроблена школою Р. Акоффа методологія ідеалізованого перерепроєктування. Стейк-холдеру пропонується створити ідеалізовану ситуацію в припущенні, що все можливо – «відчуй себе чарівником». Але мають бути враховані обмеження: технічна реалізованість і непротирічність законам природи.

Цілі повинні бути:

- реалістичні, тобто досяжні при наявних фінансових, матеріальних і часових ресурсах;
- конкретні, тобто щоб будь-яке просування до цілі вносило вклад у рішення саме даної проблеми, а не якоїсь іншої;
- вимірні, тобто дозволяли б відслідковувати процес руху до цілі шляхом вимірювань, витрати на які перебувають у допустимих межах.

У ході рішення проблеми буде необхідно порівнювати пропонувані варіанти, оцінювати ступінь досягнення цілі або відхилення від неї, здійснювати контроль над ходом подій. Це досягається шляхом виділення деяких ознак розглянутих об'єктів і процесів. Дані ознаки повинні бути пов'язані з особливостями розглянутих об'єктів або процесів, повинні бути доступними для спостереження й вимірювання. Тоді за отриманими результатами вимірювань ми зможемо здійснити необхідний контроль.

Характеристики, що дозволяють оцінювати ступінь досягнення цілі, називають критеріями. Тобто критерії – це засіб порівняння варіантів рішення проблеми (альтернатив). Найбажанішим є варіант, коли можна обмежитися одним критерієм. Так Організація Об'єднаних Націй з питань освіти, науки і культури (ЮНЕСКО) визначає рівень розвитку охорони здоров'я і освіти в країнах за одним критерієм – дитячою смертністю і відсотком неписьменних у віці до 15 років. Саме ці критерії були внесені Організацією Об'єднаних Націй до переліку індикаторів, що характеризують сталий розвиток міст.

Реальні проблеми зазвичай багатокритеріальні. Багатокритеріальність реальних задач пов'язана не тільки із множинністю цілей, але й з тим, що одну ціль рідко вдається виразити одним критерієм, хоча до цього прагнуть.

Цілі можуть бути якісними. Критерії, що характеризують досягнення цілі завжди кількісні. Тому критерії можуть розглядатися як кількісні аналоги якісних цілей, що треба досягти для вирішення проблеми і в подальших етапах системного аналізу можуть заміщувати цілі. При формуванні критеріїв треба спиратися на цілі, але обов'язково потрібно враховувати обмеження технічної,



економічної, соціальної та екологічної природи. Не врахування обмежень може призвести до визначення нереалістичних цілей. В свою чергу формулювання занадто жорстких обмежень може призвести до неприйнятних цілей, досягнення яких буде вимагати зусиль, не обумовлених характером проблеми.

Після того як цілі сформульовані і визначені критерії їхнього досягнення, необхідно визначити шляхи їх досягнення, тобто ті рішення, дії, тощо, що призводять до досягнення цілей. Множина можливих способів рішення проблеми визначається як альтернативи. Інакше кажучи, альтернатива – це дві або більше можливостей, що підлягають вибору. Взагалі існують дві форми альтернатив: такі, що різняться функціонально, і такі, що різняться операційно. Перші різняться за виглядом, а другі – за ступенями. Наприклад, якщо ціллю є переміщення між двома містами, то функціональними альтернативами можуть бути автомобіль, автобус, поїзд, а операційними – звичайний пасажирський поїзд, швидкий поїзд чи експрес.

Відправною точкою для вироблення альтернатив є аналіз розбіжностей між проблемним і цільовим місивами. Саме ці розбіжності характеризують різницю між поточним станом системи і майбутнім бажаним станом.

Генерування альтернатив – це творчий процес. Але він має базуватися на професійному розумінні сутності проблеми і урахуванні можливостей реалізації запропонованих альтернатив. Тому задача системного аналітика на даному етапі полягає в організації процесу пошуку альтернатив з використанням можливих джерел інформації щодо можливих альтернатив та процесу їх виробітки.

До основних способів визначення альтернатив можна віднести:

- пошук в літературних джерелах;
- залучення фахівців різного напряму підготовки, рівня підготовки і досвіду;
- генерування альтернатив, протилежних запропонованим;
- генерування усіх типів альтернатив, в тому числі типу «невтручання» (див. розд. 1.3);

– генерування альтернатив, розрахованих на різні часові терміни (оперативні, середньострокові, довгострокові);

– інтерв'ювання і анкетування стейк-холдерів.

До найбільш поширених методів організації процесу пошуку альтернатив відносять групові методи. Ці методи мають низку переваг над індивідуальним підходом. По-перше, нові рішення, як правило, народжуються на тлі вже існуючих, а ні одна людина не може утримувати увесь людський досвід, навіть в відносно в узькій сфері. Тому поєднання інформаційних і творчих можливостей групи людей народжують синергетичний ефект. По-друге, спілкування з іншими людьми стимулює асоціативні особливості людського мислення, тобто чужа думка може наштовхнути на асоціації, які б не виникли при індивідуальному пошуку. Робота в групі передбачає необхідність взаємних контактів. Але кількість таких контактів обмежена. Це пов'язано з тим, що інтенсивний процес синтезу рішень можливий в обмежений період часу. Тому, якщо ми ставимо на меті максимально можливе спілкування кожного учасника групи з іншими, група не повинна бути великою. Рекомендований розмір групи складає 6 – 12 осіб.

Одним з важливих факторів при організації групового процесу пошуку рішень є урахування ролі критики. Більшість людей негативно сприймають особисту критику. Тому можливість критики треба або виключити, або створити умови для можливості тільки конструктивної критики, тобто такої, що направлена на самі ідеї, і не зачіпляє особу, що її висунула.

Ще однією перешкодою є стереотипність мислення. Тому наявність великого досвіду є не тільки позитивним фактором, але і несе і негативні наслідки, тому що занурює людину в світ стереотипу. Звідки витікає необхідність залучати людей з різним рівнем кваліфікації і досвіду.

До методів, що найбільше використовуються, відносяться метод мозкового штурму, метод «Делфі», метод сценаріїв.

Метод мозкового штурму також називають методом колективної генерації ідей або методом мозкової атаки. Техніка мозкового штурму включає в себе такі дії:

- збір групи осіб, відібраних для генерації альтернатив. Головний принцип відбору полягає в підборі фахівців різних професій, досвіду роботи та кваліфікації;

- ознайомлення їх з правилами роботи, виклад всієї наявної інформації про проблему;

- група обговорює проблему, причому заздалегідь обмовляється, що вітаються як будь-які ідеї, що виникли як індивідуально, так і по асоціації, при вислуховуванні пропозицій інших учасників. Вітаються навіть ідеї, що лише незначно поліпшують висловлювання попередніх виступаючих;

- всі ідеї фіксуються. Оголошення нових ідей триває, поки не вичерпається фантазія учасників штурму. Зазвичай це відбувається через 30–40 хвилин. Як наслідок, виникає кілька десятків запропонованих альтернатив;

- всі ідеї збираються і передаються для аналізу іншій групі експертів. Усі ідеї анонімні. При цьому допускається участь в обговоренні авторів ідей.

На етапі генерації ідей необхідно дотримуватися ряду правил:

- необхідно забезпечити якомога більшу свободу мислення учасників мозкового штурму і висловлення ними нових ідей;

- допускається висловлювання будь-яких ідей, навіть якщо спочатку вони здаються сумнівними і абсурдними;

- не допускається критика, не оголошується помилковою і не припиняється обговорення жодної ідеї;

- вітається висловлювання якомога більшого числа ідей, особливо нетривіальних.

Метод «Делфі» – це розвиток ідеї мозкового штурму, яка повинна знизити вплив психологічних факторів при проведенні обговорень проблеми і підвищити об'єктивність результатів.

На відміну від традиційного підходу, який передбачає досягнення узгодженості думок експертів шляхом відкритої дискусії, метод «Делфі» пропонує повну відмову від колективних обговорень. У такому варіанті метод відрізняється від мозкового штурму тим, що учасникам забезпечується анонімність. Їх пропозиції оприлюднюються без вказівки авторства. Це робиться для того, щоб зменшити вплив таких психологічних факторів як приєднання до думки найбільш авторитетного фахівця, небажання відмовитися від публічно вираженої думки, слідування за думкою більшості.

У методі «Делфі» прямі дебати замінені ретельно розробленою програмою послідовних індивідуальних опитувань, що проводяться у формі анкетування. У зв'язку з анонімністю текстів метод «Делфі» знімає заборону на критику. Вона за визначення не може мати персональну спрямованість. Тому виникають своєрідні діалоги і дискусії, що тягнуть внесення поправок і доповнень у вихідні варіанти. Відповіді експертів узагальнюються і разом з новою додатковою інформацією надходять у розпорядження членів групи, після чого вони уточнюють свої початкові відповіді. Така процедура повторюється кілька разів до отримання прийнятної збіжності сукупності висловлених думок. Хоча теоретично число циклів процедури «Делфі» не обмежене, на практиці вона завершується після трьох-чотирьох ітерацій.

Метод сценаріїв. У деяких проблемах рішення, що розшукується, повинно описувати реальну поведінку об'єкта в майбутньому, визначати реальний хід подій. У таких випадках альтернативами є різні послідовності дій і події, що з них випливають і які можуть статися з системою в майбутньому. Ці послідовності мають загальний початковий стан і різні траєкторії руху розвитку системи. Ця відмінність і призводить до проблеми вибору. Такі гіпотетичні альтернативні описи поведінки системи в майбутньому і називаються сценаріями.

Сценарії-альтернативи – це логічно обґрунтовані моделі поведінки проблемовмісної системи в майбутньому, які після прийняття рішення можна розглядати як прогноз зміни станів системи.

Розробка сценаріїв відноситься до типових неформалізованих процедур. Для складання сценаріїв залучаються фахівці, які повинні знати загальні закономірності розвитку систем. При складанні сценаріїв проводять аналіз внутрішніх і зовнішніх факторів, що впливають на розвиток системи, визначають джерела цих факторів, цілеспрямовано аналізують висловлювання провідних фахівців в наукових публікаціях з даної тематики.

Рекомендується в тому числі розглядати найкращий хід розвитку системи (оптимістичний сценарій) і найгірший, включаючи наявність протидіючих елементів (песимістичний сценарій). Сценарій є попередньою інформацією, на основі якої про водиться подальша робота з прогнозування розвитку системи. Сценарій допомагає скласти уявлення про проблему; потім приступають до більш ретельних, як правило, кількісних процедур аналізу.

При реалізації методу сценаріїв здійснюються такі етапи: розробка плану сценарію, поділ на розділи, що відноситимуться до відповідних сфер науки, техніки, економіки тощо; розробка розділів сценарію.

## **2.2 Підходи до моделювання екологічних систем та процесів**

Модель – це матеріальний або уявний об'єкт, що зберігає типові риси реальної системи та представляє її у вигляді, зручному для дослідження її поведінки.

У системному аналізі моделі необхідні для того, щоб:

- зрозуміти, як побудований конкретний об'єкт (структура);
- навчитися управляти об'єктом або процесом та обрати найкращий спосіб управління при визначених цілях та критеріях;
- прогнозувати наслідки результатів впливу на реальний об'єкт.

Завдання системи – відстежити якісні зміни у ланцюжку «вхід – елемент – вихід». Використання моделей дозволяє визначити кількісні зміни.

Моделювання проводять у наступних випадках:

- рівень витрат при натурних дослідженнях є дуже високим;
- необхідні впливи відсутні у періоді натурних спостережень;
- ситуація теоретично може бути досліджена на практиці, але є низка причин, за якими її неможливо здійснити (вивчення ядерного вибуху);
- натурні спостереження неможливі існуючих умовах (дослідження космічних процесів).

Модель дозволяє наступне:

- визначити структуру реального об'єкту, його властивості, протікання внутрішніх процесів;
- зафіксувати результати впливу на об'єкт за умови збереження важливих головних властивостей.

Модель не завжди дозволяє врахувати усі властивості, тому як наслідок результати моделювання не завжди співпадають з реальними результатами.

Моделі поділяються на матеріальні та ідеальні.

Матеріальні моделі мають фізичне представлення у нашому світі. Вони у свою чергу поділяються на фізичні та аналогові. Головною вимогою до матеріальних моделей є відповідність реальному об'єкту.

Фізичні моделі мають ту ж фізичну природу, що й реальний об'єкт. Головною відмінністю є розмір. Тобто фізична модель – це збільшена або зменшена копія реального об'єкту. Основним принципом, якого необхідно дотримуватись при побудові фізичних моделей, є принцип подібності. Принцип подібності полягає у тому, що всі головні характеристики об'єкта повинні бути змінені пропорційно. Залежність може бути лінійною, квадратичною, тощо. У тому випадку, якщо принцип подібності порушується, модель не можна вважати адекватною (адекватність моделі – це випадок, у якому модель вірно описує властивості реального об'єкту). Як наслідок, виникає порушення подібності та невідповідності результату.

Аналогові моделі також мають фізичну природу, але вона відрізняється від природи реального об'єкту, тобто реальні фізичні процеси не співпадають, але є аналогія (співпадіння характеру процесу). Це означає, що модель та оригінал працюють за одним принципом, наприклад – заміна реальних процесів силою струму. Аналогова модель використовується у випадку, коли є впевненість, що характери процесів є однаковими. Аналогові моделі можуть використовуватися та перенастроюватися декілька разів.

Ідеальні моделі не існують у реальній природі. Ці моделі можуть бути реалізовані тільки за допомогою людської уяви та для їх зв'язку з реальним об'єктом або процесом необхідна людина.

Математичні моделі – це моделі, у яких реальні процеси описуються математичними процесами (формулами). Прикладом найпростішої математичної моделі є визначення шляху, пройденого автомобілем ( $S$ ) з постійною швидкістю ( $V$ ) за певний проміжок часу ( $t$ ):  $S = V \cdot t$ . Надана модель працює за умови постійної швидкості. У тому випадку, коли швидкість є змінним параметром, потрібна модель, що враховує її змінність, тобто математична функція.

Математична модель має наступну структуру:

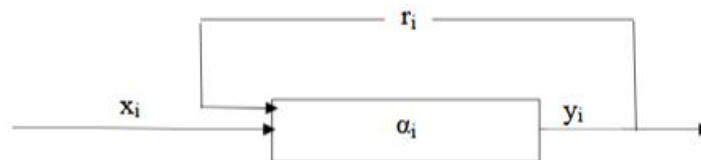


Рисунок 2. 1 – Структура математичної моделі:

$x_i$  – вхідна величина;  $\alpha_i$  – параметр системи;  $y_i$  – вихід системи;

$r_i$  – регулятор процесу

Вхідні величини  $x_i$  не залежать від характеристик системи і можуть бути незалежними (спостережними) та змінюваними (керованими). У випадку моделі  $S = V \cdot t$  вихідною величиною є час  $t$ .

Параметр системи  $\alpha_i$  залежить від властивостей системи і характеризує її внутрішню структуру. У випадку моделі  $S = V \cdot t$  параметром системи є швидкість (V).

Вихід системи  $y_i$  характеризує результат. У випадку моделі  $S = V \cdot t$  виходом системи є шлях, пройдений автомобілем (S).

Регулятор процесу  $r_i$  характеризує зворотній зв'язок між виходом та входом системи. При цьому зворотній зв'язок може бути як позитивним, так і негативним.

Усі величини (головним чином вхідні) поділяють на детерміновані та випадкові. Детерміновані величини – це величини, для яких у будь який момент часу можна визначити значення. Випадкові величини – це величини, значення яких можна лише передбачити.

Математичні моделі поділяють на детерміновані (постійні) та стохастичні (вірогідні). У детермінованих моделях одному й тому ж значенню вхідної величини завжди буде відповідати одне й те ж саме значення вихідної величини. У стохастичних моделях одному й тому ж значенню вхідної величини може відповідати певний набір вихідних величин (як правило, діапазон), для яких можна лише вказати ймовірність цього значення. Всі реальні процеси є стохастичними, тому у моделях можливо лише частково врахувати ймовірнісні фактори. Відповідно, чим більшою є кількість ймовірнісних входів, тем більш некерованим є результат.

Математичні моделі поділяють на балансові та статистичні.

Балансові (аналітичні) моделі описують протікання внутрішніх процесів.

Аналітичні моделі будуються за наступними принципами:

- використовують реальні закони природи, у першу чергу балансові;
- враховують внутрішню структуру реального об'єкту за допомогою параметрів.

Розглянемо методику побудови аналітичної моделі на прикладі процесу зростання популяції мікроорганізмів.



Розглянемо інтервал часу  $\Delta t$ . За цей час приріст чисельності мікроорганізмів  $\Delta N$  буде становити

$$\Delta N = R(N, \Delta t) - S(N, \Delta t),$$

де  $N$  – чисельність мікроорганізмів;

$R$  – чисельність народжених за час  $\Delta t$ ;

$S$  – чисельність померлих за той же час.

Припустимо, що чисельність народжених і померлих пропорційна інтервалу часу:

$$R(N, \Delta t) = R(N)\Delta t; S(N, \Delta t) = S(N)\Delta t.$$

Тоді

$$\Delta N = R(N)\Delta t; - S(N)\Delta t.$$

Поділивши обидві частини на  $\Delta t$  при  $\Delta t \rightarrow 0$ , отримаємо диференціальне рівняння:

$$\frac{dN}{dt} = R(N) - S(N).$$

Припустимо, що народжуваність та смертність прямо пропорційні чисельності:

$$R(N) = \alpha N; S(N) = \beta N.$$

Тоді

$$\frac{dN}{dt} = (\alpha - \beta)N.$$

Визначивши  $\mu = \alpha - \beta$ , отримаємо таку модель:

$$\frac{dN}{dt} = \mu N.$$

Ця модель відома як модель необмеженого зростання Мальтуса, у якій параметр  $\mu$  визначає питомий приріст кількості осіб.

Статистичні моделі будуються за принципом «чорного ящика». Модель чорного ящика не розкриває внутрішню структуру та будову системи. Для її побудови необхідно знати лише вхідні та вихідні величини.

При математичному модулюванні такі моделі мають вигляд диференційних рівнянь у тому випадку, коли потрібно описати зміну у часі або просторі. У тому випадку, коли модель описує зміни у часі, вона має назву динамічної, у протилежному випадку вона вважається статичною.

Статистична модель має вигляд функціональної залежності вигляду  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Завдання математичного моделювання полягає у знаходженні функції, що описує зв'язок між вхідною та вихідною величинами.

Визначення вхідних та вихідних величин можливо двома шляхами:

- вимірювання натурних даних;
- експериментальне дослідження, в ході якого підбирають значення вихідної величини, змінюючи значення вхідної величини (запланований експеримент).

Надалі отримані дані наносять на графік. Завданням є нанесення лінії графіку, яка найкращим чином повинна співпадати з наявними натурними даними. Методом, який дозволяє знайти найкращу функціональну залежність є метод найменших квадратів (МНК).

МНК – це математичний метод, заснований на мінімізації суми квадратів відхилень декотрих функцій від змінних. Рівняння, побудовані за МНК мають назву рівнянь регресії (тренда).

У разі, якщо у якості рівняння регресії приймається рівняння прямої (лінійна регресія), яке виглядає так:

$$y = ax + b,$$

де  $a$  – коефіцієнт, що регулює кут нахилу прямої;

$b$  – коефіцієнт, що визначає зрушення кривої відносно вісі  $x$ ;

$x$  – вхідна величина;

$y$  – вихідна величина.

Необхідно підібрати такі значення коефіцієнтів  $a$  та  $b$ , щоб відхилення від натурних точок були мінімальними.

Коефіцієнт  $a$  визначається за формулою

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}.$$

Коефіцієнт  $b$  визначається за формулою:

$$b = \frac{\sum y - a \cdot \sum x}{n}.$$

Після знаходження коефіцієнтів  $a$  та  $b$  виконується оцінка адекватності статистичної моделі за наступною методикою:

– розраховується дисперсія вибірки за формулою:

$$D = \frac{\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}}{n - 1};$$

– розраховується залишкова дисперсія за формулою:

$$D_{\text{зал}} = \frac{\sum (y_i - y_{\text{розрах}})^2}{n - 2};$$

– розраховується критерій Фішера за формулою:

$$D = \frac{D}{D_{\text{зал}}}.$$

Розрахований критерій Фішера порівнюється з його табличним значенням. У тому випадку, коли  $F > F_{\text{табл}}$ , модель вважається адекватною. У тому разі, якщо зазначена умова не дотримується, модель вважається неадекватною, тобто її не можна використовувати. Виникає потреба у пошуці моделі іншого типу, для якої умова  $F > F_{\text{табл}}$  витримується.

Вирішення рівнянь нелінійного типу зводиться до приведення цих рівнянь до виду  $y^* = a^* \cdot x^* + b^*$ , тобто виконується лінеаризація функції.

## 2.3 Методологія виробітки та оцінки можливих стратегій

Стратегія розглядається як послідовність дій, направлених на досягнення складних цілей. Тобто, стратегія представляє собою послідовність кроків, що дозволяють перевести систему з поточного стану в бажаний стан. В основі розробки стратегій лежить прогноз, як аргументоване уявлення про майбутній стан системи. Стратегія має давати відповіді на запитання: які зміни повинні бути здійснені в системі або вхідних впливах для досягнення цілей, яким чином можна здійснити такі зміни і які ресурси потрібні для цього. Розробка стратегій по своїй суті є процесом прийняття послідовності рішень в умовах невизначеностей та ризиків.

Для підвищення точності обраних рішень, передбачення результатів наслідків у майбутньому рекомендується вибирати кілька можливих альтернатив і для кожної намічати кращий курс дій, тобто мають бути розглянуті альтернативні (конкуруючі) стратегії.

При відсутності повної інформації про можливі ризики, якщо ОПР воліє не робити допущень щодо ймовірностей різних зовнішніх умов, використовуються «методи теорії прийняття рішень».

В основі рішення лежить так звана матриця виграшів, яка відображає ймовірні виграші, які виникають у зв'язку з тими або іншими зовнішніми факторами при використанні різних стратегій.

Розглянемо даний підхід на прикладі.

При експлуатації природоохоронного устаткування можливі наступні стани обладнання:

S1 – потрібен профілактичний ремонт;

S2 – потрібно замінити окремі деталі або вузли;

S3 – потрібен капітальний ремонт.

Про ймовірності настання кожного із цих подій нічого не відомо.

ОПР може прийняти одне з трьох рішень:

R1 – ремонт обладнання власними силами;

P2 – ремонт обладнання спеціалізованим підприємством;

P3 – покупка нового обладнання.

Матриця витрат  $a_{ij}$  має наступний вигляд (табл. 2.1)

Таблиця 2.1 – Матриця витрат

Рішення Витрати	C1	C2	C3
P1	- 4	- 6	- 9
P2	- 5	- 8	- 7
P3	- 20	- 15	- 6

Знак мінус у таблиці використовується, тому що значення характеризують витрати, а не виграші.

Необхідно вибрати стратегію, яка забезпечує найменші витрати.

Для оцінки рішень ОПР може використовувати різні стратегії, виходячи з особливостей задачі й психології ОПР:

а) стратегія оптимізму. У цьому випадку ОПР виходить із того, що реалізується найбільш сприятлива ситуація. Це означає, що підприємство понесе найменший збиток. Цій ситуації відповідає стан обладнання C1 з використанням стратегії P1, тобто обладнанню буде потрібен профілактичний ремонт, який буде здійснений власними силами й витрати при цьому складуть 4 од. Однак, якщо оптимізм ОПР не виправдається, то й втрати будуть великі;

б) стратегія песимізму (критерій Вальда). За цим критерієм ОПР вибирає ту стратегію, яка гарантує в найгірших умовах максимальний виграш. Такий вибір відповідає найбільш боязкій поведінці ОПР, коли він припускає найбільш несприятливий збіг зовнішніх обставин і боїться великих втрат. Але й розраховувати на великий виграш також не доводиться. Найгірші умови = найменший виграш при використанні рішення P1 дорівнює - 9, рішення P2 дорівнює - 8 і рішення P3 дорівнює - 20. Максимальне

із цих значень – 8. Воно відповідає рішенню P2 – використання послуг спеціалізованого підприємства.

Обидва розглянуті підходи відповідають крайнім точкам зору й тому їх використання не завжди виправдане. Більш доцільно використовувати деякі компромісні стратегії;

в) стратегія песимізму-оптимізму (критерій Гурвіца). Це компромісний спосіб прийняття рішень в умовах невизначеності. Для кожної з можливостей – одержання максимального виграшу й мінімального виграшу – визначається ймовірність її настання. Сума ймовірностей двох варіантів повинна дорівнювати одиниці. Тобто, якщо ймовірність максимального виграшу  $\gamma$ , то ймовірність мінімального виграшу буде  $(1-\gamma)$ .

Подальший розрахунок здійснюються наступним образом:

– по кожному рішенню P1–P3 визначається максимальна величина оцінки  $a_{ij}$  і множиться на  $\gamma$ ;

– по кожному рішенню P1–P3 визначається мінімальна величина оцінки  $a_{ij}$  множиться на  $1-\gamma$ ;

– отримані величини для кожного рішення P1–P3 підсумовуються;

– вибирається те рішення, для якого отримана сума максимальна.

У цьому прикладі прийmemo рівень «оптимізму»  $\gamma = 0,6$ .

Тоді:

– для рішення P1: максимальне значення  $\max(a_{ij}) = -4$ ; мінімальне значення  $\min(a_{ij}) = -9$ ;  $\gamma \max(a_{ij}) + (1-\gamma) \min(a_{ij}) = -6$ ;

– для рішення P2: максимальне значення  $\max(a_{ij}) = -5$ ; мінімальне значення  $\min(a_{ij}) = -8$ ;  $\gamma \max(a_{ij}) + (1-\gamma) \min(a_{ij}) = -6,2$ ;

– для рішення P3: максимальне значення  $\max(a_{ij}) = -6$ ; мінімальне значення  $\min(a_{ij}) = -20$ ;  $\gamma \max(a_{ij}) + (1-\gamma) \min(a_{ij}) = -11,8$ .

Найбільше значення відповідає P1 – ремонт власними силами.

Після ухвалення рішення про те, яке саме з рішень передбачається здійснити, починається робота з реалізації цього рішення. На цьому етапі здійснюється планування ресурсів, що потрібні для реалізації обраного рішення.

Для кожного виду ресурсу повинне бути визначено:

- скільки ресурсу буде потрібно, де й коли;
- скільки ресурсу буде в наявності в призначених місці й часу;
- що повинне робитися у випадку нестачі або надлишку ресурсу.

Повинні бути розглянуті всі види ресурсів, а саме:

- люди з їхніми компетенціями й кваліфікацією;
- будівлі й устаткування(капітальні витрати);
- матеріали по видах і обсягам запасів, енергія (експлуатаційні витрати);
- гроші;
- інформація;
- час.

Наступна фаза – організація виконання рішення. Ця дія, по суті, є актом управління.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пэнтл Р. Методы системного анализа окружающей среды / Р. Пэнтл. – М. : Мир, 1979. – 512 с.

2. Джефферс Дж. Введение в системный анализ: применение в экологии / Дж. Джефферс ; пер. с англ. Д. О. Логофет ; под ред. Ю. М. Свирежев. – М. : Мир, 1981 . – 256 с

2. Оптнер С. Л. Системный анализ для решения проблем бизнеса и промышленности / Станфорд Л. Оптнер. – 2-е изд. – М. : Концепт, 2003. – 206 с.

4. Теорія систем в екології : підручник / [Ю. Г. Масікевич, О. В. Шестопапов, А. А. Негадайло та ін.]. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 330 с.

5. Примак А. В. Системный анализ контроля и управления качеством воды и воздуха / А. В. Примак, В. В. Кафаров, К. И. Качиашвили. – Киев : Наук. думка, 1991. – 360 с.



*Навчальне видання*

**ПОНОМАРЕНКО Євгеній Георгійович,  
ЛОМАКІНА Ольга Сергіївна**

## **МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ТА ПРОЦЕСІВ**

### **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів 1 та 2 курсів усіх форм навчання першого (бакалаврського)  
рівня спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища)*

Відповідальний за випуск *Т. В. Дмитренко*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *О. С. Ломакіна*

План 2019, поз. 54Л

---

Підп. до друку 22.06.2020 р. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк арк. 2,4.

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.