

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

**В.О. Бараннік, Т.В. Дмитренко**

***СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ДОВКІЛЛЯ.***  
***СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ***

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

(для студентів 2 курсу денної і 3 курсу заочної форм навчання  
за напрямом підготовки 6.040106 “Екологія, охорона навколишнього середовища та  
збалансоване природокористування”)

**ХАРКІВ ХНАМГ 2011**

**Бараннік В. О.** Конспект лекцій з дисциплін “Системний аналіз довкілля”, “Системний аналіз” (для студентів 2 курсу денної і 3 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.040106 “Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування”) / Бараннік В.О., Дмитренко Т.В.; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 44 с.

Автори: к.ф.-м.н., доц. В.О. Бараннік,  
к.т.н., доц. Т.В. Дмитренко

Рецензент: к.т.н., доц. І.Ю. Саратов

Рекомендовано кафедрою інженерної екології міст,  
протокол № 9 від 30.03.2009 р.

## ЗМІСТ

	Стор.
Вступ. ....	4
1. Предмет системного аналізу. Цілі й завдання курсу. Основні терміни й визначення. ....	5
2. Основні етапи планування (управління) систем навколишнього середовища і суспільства; основні операції етапів. ....	6
2.1. Етапи системного аналізу. ....	6
2.1.1. Постановка завдання. ....	6
2.1.2. Моделювання і аналіз. ....	7
2.1.3. Оцінка варіантів можливих рішень. ....	9
3. Поняття системи. ....	11
4. Методологія побудови складних систем. ....	13
4.1. Методологія побудови або ідентифікації складних систем. ....	13
4.2. Структурне розбиття і моделювання системи. ....	13
4.3. Змінні, що характеризують систему і управління системою. ....	16
4.4. Прогнозування умов функціонування системи в майбутньому. ....	17
5. Методологія постановки завдання системного аналізу і обмеження її складності. ....	18
6. Методологія моделювання і аналізу. ....	22
6.1. Моделювання і аналіз. ....	22
6.1.1. Збір інформації для встановлення кількісного взаємозв'язку між змінними (елементами системи) ....	23
6.1.2. Побудова моделі системи; конкретизація кількісних взаємозв'язків між змінними. ....	23
6.1.3. Перевірка встановлених взаємозв'язків між змінними. ....	25
6.1.4. Оцінка допущень і виявлення невизначеностей. ....	25
6.2. Отримання інформації від експертів. ....	25
7. Методологія оцінки результатів рішення. ....	27
7.1. Визначення міри для кожного показника стану об'єкта. ....	27
7.2. Об'єднання всіх показників в єдине уявлення або функцію, за якими можна вибрати найбільш бажаний варіант рішення. ....	28
8. Моделі. Види моделей. Матеріальні моделі. ....	29
9. Принцип матеріального балансу й побудова балансових моделей. ....	32
10. Принцип “чорного ящика” й побудова статистичних моделей. ....	33
11. Застосування обчислювальної техніки в системному аналізі. ....	34
12. Експертні методи системного аналізу ....	35
12.1. Умови використання експертних оцінок в системному аналізі. ....	35
12.2. Основні проблеми теорії і практики експертних оцінок. ....	35
12.3. Догма одновимірності. ....	37
12.4. Основні стадії експертного опиту. ....	39
12.5. Підбір експертів ....	39
12.6. Метод “мозкового штурму”. ....	41
12.7. Метод Делфі. ....	42
Список джерел. ....	43

## ВСТУП

Фахівці в галузі охорони навколишнього середовища й збалансованого природокористування мають бути добре обізнані з методами досліджень, що застосовуються на різних стадіях системного аналізу довкілля, таких як:

- 1) пошук можливих варіантів вирішення проблеми;
- 2) визначення наслідків використання (застосування) кожного з можливих варіантів рішення;
- 3) застосування об'єктивних тверджень або критеріїв, які вказують, чи є одне рішення більш переважним за інше. При цьому не передбачається, що використовувані способи вибору рішення є єдиними або що вони не мають невизначеностей;
- 4) надання інформації особі, яка приймає рішення (ОПР), разом з описом ефектів, що отримуються при зміні параметрів системи, при зміні системи оцінок або при заміні одного варіанта рішення на інший.

Метою даного курсу є забезпечення загальноінженерної підготовки фахівців у галузі аналізу складних систем навколишнього середовища як основи для вивчення професійно-орієнтованих дисциплін і надання теоретичних знань та практичних навичок з системного аналізу в достатньому для професійної спеціалізації обсязі.

У цьому конспекті лекцій пропонується стислий зміст лекційного курсу з дисципліни «Системний аналіз довкілля» («Системний аналіз»), що відзначений у програмі й робочій програмі навчальної дисципліни, й рекомендується відповідна література.

# **1. Предмет системного аналізу. Цілі й завдання курсу.**

## **Основні терміни й визначення**

Системний аналіз довкілля – дисципліна, що розробляє і застосовує способи дослідження різноманітних складних систем або ситуацій при нечітко поставлених цілях (критеріях). Ця дисципліна об'єднує досягнення різних точних, прикладних і гуманітарних дисциплін, починаючи від математичного аналізу і до соціальної психології.

Складна система – система або об'єкт навколишнього природного середовища, властивості якого не можуть бути точно визначені через недостатні знання процесів у межах системи і/або процесів її взаємодії з оточенням.

Нечітко поставлені цілі (критерії) - умови невизначеності, при яких критерії оцінки стану системи не є кількісно визначеними або не вичерпують різноманіття її станів або не є загальноприйнятими.

Причинами малої ефективності застосування системного аналізу як методу розробки раціональних програм управління складними системами навколишнього середовища, програм сталого розвитку є:

- невміння розробників представляти інформацію у формі, зрозумілій для особи, яка приймає рішення (ОПР);
- переоцінка можливостей системного аналізу;
- неадекватність даних;
- невизначеність і труднощі встановлення причинно-наслідкових взаємозв'язків між змінними, що описують стан систем навколишнього середовища;
- досить поширена думка про неможливість використання аналітичних методів дослідження при вирішенні проблем навколишнього середовища;
- нездатність деяких розробників виразити цілі планування так, щоб можна було оцінити прогрес у вирішенні поставленого завдання.

За своїм змістом і призначенням методи системного аналізу забезпечують способи конструювання варіантів вирішення проблеми, яка зачіпає інтереси осіб, що не співпадають або навіть з суперечливими інтересами, а також способи вибору єдиного якнайкращого з усіх точок зору компромісного варіанта.

## **2. Основні етапи планування (управління) систем навколишнього середовища і суспільства; основні операції етапів**

### **2.1. Етапи системного аналізу:**

- 1) вишукування можливих варіантів вирішення проблеми;
- 2) визначення наслідків використання (застосування) кожного з можливих варіантів рішення;
- 3) застосування об'єктивних тверджень або критеріїв, які вказують, чи є одне рішення більш переважним за інше. При цьому не передбачається, що використані способи вибору рішення є єдиними або що вони не мають невизначеностей;
- 4) подання інформації особі, яка приймає рішення (ОПР), разом з описом ефектів, що отримуються при зміні параметрів системи, при зміні системи оцінок або при заміні одного варіанту рішення на іншій.

#### **2.1.1. Постановка завдання**

- 1. *Розділення суспільства на групи осіб за спільністю їх інтересів відносно даної системи (проблеми)***
- 2. *Визначення загальних інтересів для кожної групи осіб, формулювання цілей аналізу, що проводиться, вибір критеріїв оцінки очікуваних результатів***

Перехід від цілей до критеріїв досягається шляхом послідовного дроблення мети на часткові цілі (побудова дерева цілей) до тих пір, поки не будуть отримані показники (підцілі), які можуть бути оцінені або розмірною величиною (наприклад, вартість, вага, концентрація, частота і т. д.), або за допомогою коефіцієнта значущості (наприклад, від 0 до 1 для оцінки естетики морського побережжя).

- 3. *Формування уявлень про структуру проблеми і про модель системи***

Якщо проблема або система розділені на складові, то полегшується можливість її вивчення і можливе доручення роботи окремим виконавцям. Звичайно корисно розчленувати проблему або систему так, щоб взаємодія між її структурними елементами була відносно малою або визначною.

**4. *Визначення стану вивченої проблеми і необхідності додаткової інформації***

**5. *Опис системи. Визначення вхідних (екзогенних), вихідних (ендогенних) і керівних змінних системи***

Екзогенні змінні – це вхідні чинники, що не змінюються при функціонуванні системи. Ендогенні змінні – це вихідні змінні або змінні стану системи. Основне призначення аналізу – набутти найбільш бажаних значень керівних (вирішальних) змінних.

Інтереси соціальних груп визначають кількість виходів системи (вихідних змінних). Кількість керівних змінних системи визначає кількість варіантів рішення.

**6. *Перерахування можливих варіантів рішення***

**7. *Оцінка майбутніх умов, що включає прогнози відносно змінних і змін в техніці***

*На етапі постановки завдання отримують якісний опис проблеми і/або системи.*

**2.1.2. Моделювання і аналіз**

*На етапі моделювання якісне представлення проблеми і/або системи переводять в кількісний опис.*

**1. *Збір інформації для встановлення кількісного взаємозв'язку між змінними (елементами системи)***

Існує чотири способи отримання необхідної інформації:

- літературні джерела;
- натурні дослідження;
- експериментальні дослідження;
- експертні оцінки.

Літературні джерела - найбільш дешевий спосіб отримання інформації, вона достатньо достовірна (але не завжди).

Натурні дослідження полягають у вивченні реального процесу або явища шляхом кількісного визначення необхідних характеристик (наприклад, концентрації розчиненого кисню).

Експериментальні дослідження полягають у проведенні спостережень в умовах, коли на об'єкт або процес, що досліджується, здійснюється контрольована дослідником дія. Експеримент може бути натурним, тобто проводитися на реальному об'єкті, і може бути лабораторним експериментом.

Експертна оцінка застосовується тоді, коли неможливо застосувати вище перелічені методи або коли параметри, що цікавлять, не мають реальних фізичних показників, тобто не можуть бути заміряні фізично. Вона заснована на досвіді і знаннях експертів. У цьому випадку великою є складова суб'єктивного чинника, оскільки експертам ніщо людське не чуже. З урахуванням суб'єктивного чинника одне і те ж явище може отримувати різну оцінку, навіть якщо експерти входять до групи осіб зі схожими інтересами, досвідом і знаннями. Головне завдання при організації експертного оцінювання полягає в мінімізації внеску суб'єктивного чинника. Тому для проведення експертного оцінювання необхідно підібрати команду експертів з різними поглядами на дану проблему. Отримання інформації від експертів може бути корисне для:

- оцінки наявних даних з погляду їх надійності, точності й застосовності;
- уточнення варіантів рішення і керівних змінних системи;
- вказівки показників, які можуть бути використані для оцінки рішень.

## ***2. Побудова моделі системи; конкретизація кількісних взаємозв'язків між змінними***

На цьому під етапі реальний процес, система або проблема (далі – об'єкт) представляються у вигляді моделі. Під *моделлю* розуміється реальний або уявний об'єкт, який імітує реальний об'єкт у вигляді, зручному для його вивчення, і зберігає істотні для вивчення властивості реального об'єкту. Тут встановлюються (де це можливо) чисельні значення параметрів моделі на основі наявних даних. Ця процедура називається *калібруванням (настройка) моделі*.



Якщо вихідні змінні являють собою оцінюючі думки (з використанням коефіцієнта значущості), бажаною формою подання взаємозв'язку між вхідними і вихідними змінними, ймовірно, буде таблиця, в якій одна колонка представляє опис станів системи, а в іншій колонці наведені коефіцієнти значущості. Шкала коефіцієнта значущості містить значення від 0 до 1, де 0 характеризує найменш бажаний рівень, а 1 – найбільш бажаний.

### ***3. Перевірка встановлених взаємозв'язків між змінними***

Сенс цієї процедури полягає у забезпеченні упевненості в тому, що побудована модель відповідає (адекватна) реальному об'єкту. З цією метою бажане проведення верифікації моделі, яка полягає в тому, що результати тестового моделювання порівнюють з незалежними даними, і, якщо результати порівняння визнаються задовільними, то модель вважається адекватною об'єкту, що вивчається.

### ***4. Оцінка допущень і виявлення невизначеностей***

Ця процедура дозволяє виключити ті зв'язки й елементи системи, які не роблять істотного впливу на ендогенні (вихідні) змінні (виходи системи) або для яких неможливо побудувати достовірну модель. Використовуючи метод песимістичної й оптимістичної оцінок, можна визначити поведінку системи в інтервалі можливих значень вхідних змінних. У цьому випадку може бути вибране таке рішення, яке мало чутливе до змін невизначених змінних.

#### **2.1.3. Оцінка варіантів можливих рішень**

***На цьому етапі дослідник повинен спробувати класифікувати можливі варіанти рішення за ступенем їх переваги.***

#### ***1. Визначення міри для кожного показника стану об'єкта***

Мірою кожного показника може бути його якісний опис (впорядкування ознак і показників). При виборі шкали оцінок корисності (значущості) доцільно встановити інтервал можливих змін показника. Якнайкраще (найбільш прийнятне) значення

зручно взяти за одиницю, а найменш прийнятне – за нуль. Якнайкраще значення кожного показника може бути набуто, якби метою програми, що розробляється, була максимізація значення цього показника. Якнайгірше значення показника визначається його мінімальним значенням, яке ще могло б статися для всіх зацікавлених сторін.

Важливість і складність цього етапу полягає в тому, що він завершальний. На цьому етапі необхідно дати не саме єдине рішення, а вказати прийнятний шлях порівняння різних рішень.

## ***2. Об'єднання всіх показників в єдине уявлення або функцію, за якими можна вибрати найбільш бажаний варіант рішення***

Для вибору варіанта рішення з конкретними значеннями вирішальних змінних необхідно перетворити векторний опис об'єкта (системи) в скалярний, названий цільовою функцією:

$$F = \sum_i w_i \cdot u_i ,$$

де  $u_i$  - оцінка корисності  $i$ -го показника;  $w_i$  - його відносна значущість; (повинна виконуватися умова  $\sum w_i = 1$ ).

Для визначення  $w_i$  можна розташувати показники в ряд в передбачуваному порядку убуття важливості і провести попарне порівняння.

Якщо отримання єдиного набору вагових множників  $w_i$ , що представляє однакову точку зору різних груп осіб, виявляється неможливим, то часто доцільно вказати домінуюче рішення для кожної сукупності наборів вагових множників.

### 3. Поняття системи

У визначенні системи немає вичерпного підходу. Згідно з Є.Г. Юдіним система є таким об'єднанням елементів, яке забезпечує органічне ціле. Решта всіх елементів, що не включаються в систему, відноситься до зовнішнього середовища. Системотвірним чинником може служити інформація щодо поставленої мети. Це означає, що рішення про включення або не включення елемента в систему ухвалюється на раціональному або суб'єктивному рівні залежно від поставленої мети дослідження.

Стан системи – деяка внутрішня характеристика системи, що охоплює ту частину минулого і сьогодення системи, яка визначає поведінку системи в майбутньому (динамічний підхід). З іншого боку, стан системи часто визначають як мінімальний обсяг відомостей про неї, які задовольняють конкретним науковим або практичним цілям її вивчення (інформаційний підхід).

Щоб полегшити розуміння складних екологічних процесів, широко використовують концептуальні й словесні моделі.

Концептуальною моделлю системи називається графічний і словесний опис системи, який включає опис елементів системи і взаємозв'язків між ними.

Для того, щоб викласти концептуальну модель системи, необхідно:

- перерахувати і назвати елементи, складові системи (визначити структуру системи);
- перерахувати функції елементів системи (яку функцію виконує даний елемент у системі);
- перерахувати взаємодії елементів системи між собою і навколишнім середовищем;
- описати взаємодію елементів системи між собою і навколишнім середовищем, які визначаються потоками речовини, енергії, інформації, послуг і грошей;
- концептуальну модель системи прийнято зображати графічною діаграмою, в якій елементи системи зображуються геометричними фігурами (квадрати, прямокутники, кола і т. д.), в яких розміщуються написи, що пояснюють їх сенс;
- взаємодії елементів системи звичайно зображають стрілками, які умовно показують напрями потоків речовин, енергії, інформації, послуг, вимог або

грошей від навколишнього середовища до елементів системи або від одних елементів системи до інших елементів.

Розбиття може також проводитися з урахуванням порядку операцій, що проводяться, і потоків інформації.

Біологічні системи показали б безнадійно складними, якби їх описували у всіх подробицях, не вдаючись до схем і спрощень. У системному аналізі при створенні абстрактних моделей неухильно визнається і враховується складність реальних систем; системний аналіз - це тільки засіб, що допомагає зрозуміти системи.

Можливість описати й передбачити поведінку екологічних систем за допомогою моделей значною мірою залежить від одного принципу, що відноситься до всіх систем взагалі - від принципу ієрархічної організації (або принципу інтеграційних рівнів). Цей принцип стверджує, що для прогнозу поведінки системи не обов'язково точно знати, як її компоненти побудовані з простіших компонентів. Так, для того, щоб описувати фізіологію кліток, не обов'язково вичерпно розуміти її біохімію; так само для опису динаміки популяцій тварин не потрібно ґрунтовних знань з фізіології.

Процеси і структури в екологічних системах можна представити у вигляді “чорних ящиків”, що складаються з простіших чорних ящиків і створюючих ієрархію складності.

Хоча моделі є недосконалі абстракції реальних систем, вони служать екологу потужним інструментом, оскільки орієнтовні відповіді й прогнози щодо істотних моментів зрештою важливіші за точне знання неістотних деталей.

Математичні символи у ряді випадків є зручним способом стислого опису складних екологічних систем, а рівняння дозволяють формально виразити можливий спосіб взаємодії різних компонентів екосистеми. Відповідна математична система називається моделлю, вона є неповним і абстрактним відображенням реального світу.

Хоча ми часто думаємо про “моделі” в термінах рівнянь і обчислювальних машин, їх можна визначити більш узагальнено як будь-яке фізичне або абстрактне подання структури і функцій реальних систем.

## **4. Методологія побудови складних систем**

### **4.1. Методологія побудови або ідентифікації складних систем**

Щоб сформувати систему, необхідно, виходячи з поставленої мети дослідження:

- визначити елементи, що належать до неї, щодо вибраних ознак;
- визначити ієрархічну структуру елементів, тобто підсистеми, щодо єдності їх ознак;
- визначити взаємозв'язки між підсистемами і їх зв'язки з навколишнім середовищем, вказавши відповідні потоки речовин, енергії, послуг і інформації.

### **4.2. Структурне розбиття і моделювання системи**

Часто буває корисним проведення якісного розгляду структурного розбиття і моделювання системи. Структурне розбиття полягає в розділенні загальної проблеми на дрібніші часткові проблеми, а моделювання системи - у спробі визначити взаємодію між її елементами. Доцільність дослідження структурного розбиття і моделювання системи обумовлена наступними причинами:

- звичайно легко вивчати часткові проблеми, ніж вирішувати одразу проблему в цілому;
- якщо проблема розділена на складові частини, полегшується доручення роботи окремим виконавцям;
- можуть бути визначені якісні взаємозв'язки типу “хто впливає, на що і як саме”;
- якщо проведено моделювання системи, то, як правило, легко визначити, яку додаткову інформацію необхідно мати для повнішого розуміння системи;
- число змінних, що відносяться до системи в цілому, може перевищити можливості сприйняття, або обробка відомостей в таких змінних може виявитися дорогою.

Структурне розбиття і моделювання не є однозначними і незмінними, оскільки існує багато шляхів виконання відповідних операцій, і виключно маловірогідне, що сформульоване конкретне уявлення про систему залишатиметься незмінним протягом всього аналізу. Дійсно, у процесі дослідження, звичайно, відбувається вдосконалення моделі від досить грубої до більш детальнішої.

Один з методів структурного розбиття проблеми полягає в розгляді проблеми в рамках окремих інтервалів часу з ухваленням рішень і оцінками їх для кожного інтервалу. Є декілька причин, за якими розгляд проблеми в тимчасових інтервалах доцільний. Одна з причин полягає в тому, що коли відносна зміна змінних в даному інтервалі часу мала, то їх можна вважати постійними.

Інша причина може бути пов'язана з тим, що в системі відбуваються дискретні зміни змінних в певні моменти часу. Наприклад, якщо фінансування проекту міняється кожні три роки, то, ймовірно, було б доцільно вести розгляд стосовно трирічних інтервалів часу. Нарешті, розгляд проблеми в тимчасових інтервалах може дозволити укладачеві плану ухвалювати рішення не відразу, а поетапно, оскільки при цьому число змінних на будь-якому інтервалі часу буде менше, ніж при розгляді проблеми в цілому.

Структурне розбиття проблеми може здійснюватися також на основі наукових дисциплін. Такий підхід до створення структури зручний тим, що дозволяє легше здійснювати розподіл робіт між різними виконавцями і керівниками. Проте якщо в процесі планування бажаним є врахування тісного взаємозв'язку між різними частковими проблемами, то розбиття основної проблеми відповідно до наукових дисциплін може виявитися невідповідним, оскільки при такому підході ослабляється контакт між представниками різних дисциплін.

Уявлення про структуру проблеми може бути створене відповідно до загальних інтересів осіб, віднесених до однієї групи. Наприклад, дослідження транспортної проблеми може бути проведене з погляду інтересів споживачів, власників, суспільства і членів виконавчих органів.

Ще один метод структурного розбиття проблеми заснований на її розгляді стосовно різних географічних областей. Такий розгляд зручний в тих випадках, коли введення змін в одну область не викликає значних змін в інших областях.

Різні часткові проблеми можуть бути у подальшому розбиті. Наприклад, розробки, що проводяться на першому тимчасовому інтервалі, можуть бути розбиті на географічній основі. Чим глибше структурне розбиття проблеми в цілому, тим меншу кількість рішень необхідно прийняти щодо кожного елемента структури (одиниці розбиття) і, отже, простіше проводити аналіз. Проте кожен елемент структури по-різному взаємодіє з рештою елементів, тому поведінка системи в цілому не визначатиметься сумою рішень, відповідних всім елементам, що розглянуті окремо.

Чим більше число підсистем, на які розбита система, тим складніше визначити роботу всієї системи щодо роботи підсистем. Звичайно корисно розчленовувати проблему так, щоб взаємодія між її структурними елементами була відносно малою або визначною. Якщо складність взаємодії між елементами при подальшому розбитті помітно спрощується, то воно доцільне. У кожному конкретному випадку необхідний компроміс між меншістю структурних елементів, що полегшує їх аналіз, і трудністю синтезу цілого щодо його частин.

Однією з цілей розбиття є визначення меж проблеми. Дослідження може бути обмежене певною географічною областю, конкретним періодом часу, набором груп осіб із загальними інтересами і числом вхідних і вихідних змінних. Припустимо, що вдалося визначити кордони, в межах яких проблема не втрачає значущості. Тоді незалежно від того, як проходять ці кордони, виникає питання: чому щось включене в розгляд. При встановленні меж проблеми необхідно шукати компроміс між можливістю її ефективного рішення і обліком кількості критичних чинників.

Розбиття може також проводитися на базі джерел і потоків об'єктів. Як об'єкти можуть розглядатися гроші, матеріали, люди, речовини, що забруднюють повітря, та інше.

#### **4.3. Змінні, що характеризують систему і управління системою**

Вхідні змінні - це чинники, які роблять вплив на систему. Передбачається, що деякі з цих змінних, названі екзогенними або незалежними, не змінюються при функціонуванні системи. Для транспортної мережі такими змінними можуть бути відстані між містами, приріст населення, технологічні чинники і кліматичні умови. Вихідні змінні, які називаються також залежними, ендogenousними або змінними станами, описують робочі властивості системи. Вихідними змінними, що становлять інтерес для пасажирів, є час, витрати, зручності, комфорт і бажання їздити. Ці змінні визначаються цілями й інтересами осіб, які входять в групи, і характеризуються кількісно відповідними показниками. Дана змінна може бути екзогенною або ендogenousною залежно від вирішуваної проблеми. У деяких випадках приріст населення може бути не чутливий до змін, що відбуваються в даній області, і, отже, він буде екзогенною змінною. З іншого боку, якщо розглядається вплив якихось чинників на приріст населення, то останній стає ендogenousною змінною.

Значення, що набуваються вихідними змінними, визначаються значеннями вхідних змінних і особливостями системи або мережі, яка вводиться програмою, що розробляється. При проектуванні системи дослідник або укладач плану може управляти певними чинниками, тому вони називаються змінними, що управляють або вирішують. У проблемі транспортної мережі вирішальними змінними можуть бути лінії зв'язку між містами, комбінація різних видів транспорту (літаки, автобуси, поїзди, автомобілі), можливості (потужності) кожного виду транспорту і терміни введення нових ліній зв'язку або видів транспорту. Основне призначення аналізу полягає в набутті найбільш бажаних значень вирішальних змінних.



#### **4.4. Прогнозування умов функціонування системи в майбутньому**

Ця операція означає, що дослідник повинен зробити оцінки умов, при яких система функціонуватиме в майбутньому. Ці оцінки повинні включати прогнози приросту населення і поліпшення економіки, можливий прогрес в технології, зміну соціальних умов. Очевидно, що в цих прогнозах буде невизначеність, і один з методів роботи з невизначеними даними полягає в аналізі проблеми при різних значеннях невизначених вхідних змінних. Наприклад, при дослідженні транспортної проблеми країни можуть розглядатися два варіанти розподілу населення у 2015 р. Один варіант може бути заснований на екстраполяції існуючих тенденцій на майбутнє, а інший може відповідати розподілу населення у разі проведення політики, направленої на стимулювання зростання певної частини регіону. При проектуванні і аналізі транспортної системи обидва ці варіанти мають розглядатися спільно з можливими комбінаціями видів транспорту.

Не всі операції, перераховані у складі операцій системного аналізу, повинні здійснюватися при вирішенні кожної проблеми, і порядок виконання робіт, як вже було сказано, не є єдиним. Вказані відмінності в підході до вирішення різних проблем не такі істотні. Істотно, проте, те, що кожен аналіз містить етап постановка завдання, який починається з достатньо загальних формулювань цілей, а закінчується визначенням критичних змінних і якісним визначенням взаємозв'язків між змінними. Постановка завдання, звичайно, повторюється протягом всього процесу дослідження. Після отримання інформації з останніх етапів дослідження може бути знов проведене визначення цілей програми, що розробляється, зміна структурного розбиття або розгляд додаткових варіантів рішення.

## **5. Методологія постановки завдання системного аналізу і обмеження її складності**

### ***Модельний приклад до теми***

#### **Постановка завдання**

##### **1.1. Якісне формулювання проблеми**

**Евтрофікація оз. Кругле:** протягом останнього десятиліття оз. Кругле, на березі якого розташований пмт. Приозерне, і яке раніше служило привабливим містом рекреації (купання, спортивне рибальство, туризм) для місцевого населення і туристів, значною мірою втрачає свою привабливість через посилення явищ, пов'язаних з появою замору риб. Це викликає тривогу тієї частини місцевого населення, для якого оз. Кругле є переважним місцем відпочинку, а також яке отримує певний прибуток за рахунок обслуговування туристів. У зв'язку з цим місцевим представницьким і виконавчим органам влади необхідно прийняти заходи по відновленню минулої привабливості цих місць.

##### **1.2. Ділення суспільства на групи осіб за спільністю їх інтересів відносно даної системи (проблеми):**

- представницькі органи влади (залежність від виборців, зацікавлених в даній проблемі) - група I;
- жителі, для яких оз. Кругле є переважним місцем відпочинку, спортивного рибальства – група II;
- жителі, для яких оз. Кругле є джерелом прибутку - група III;
- працівники КСП, фермери, земельні угіддя яких розташовані в межах водозбірної території озера - група IV;
- працівники місцевих промпідприємств - група V;
- виконавчі органи влади, в чийй власності знаходяться міські каналізаційні мережі - група VI.

**1.3. Визначення загальних інтересів для кожної групи осіб, формулювання цілей аналізу, що проводиться, і вибір критеріїв оцінки очікуваних результатів:**

- група I: збільшити свій виборчий рейтинг у населення;  
збільшити прибуток місцевого бюджету;
- група II: поліпшити свої можливості рекреаційного використання озера;
- група III: збільшити свій прибуток за рахунок інтенсифікації рибоводства;
- група IV: збільшити свій прибуток за рахунок інтенсифікації землеробства (добрива, отрутохімікати);
- група V: збільшити свій прибуток за рахунок основного виробництва;
- група VI: збільшити муніципальний прибуток від каналізаційного господарства.

#### **1.4. Формування уявлень щодо структури проблеми і моделі системи**

Якщо проблема або система розділені на складники, то полегшується можливість її вивчення і можливе доручення роботи окремим виконавцям. Зазвичай корисно розчленувати проблему або систему так, щоб взаємодія між її структурними елементами була відносно малою або визначною.

Уявлення про модель системи (розглядається тільки проблема замору риби):

- залежність концентрації БСК в притоці від якості і кількості стічних вод населеного пункту.

Модель навантаження озера БСК в зимовий період:

- залежність концентрації розчиненого кисню (РК) в притоці від якості і кількості стічних вод населеного пункту.

Модель режиму РК в озері в зимовий період:

- залежність концентрації РК в озері від концентрації БСК в притоці, концентрації РК в притоці, активній площі донних відкладень і площі вільної поверхні озера.

Модель впливу режиму РК в озері на характер заморних явищ:

- залежність частоти настання і тяжкості заморних явищ від режиму РК в озері.

### **1.5. Визначення стану вивченої проблеми і необхідності додаткової інформації**

Проблема раніше не вивчалася, тому місцева Рада народних депутатів ухвалила рішення запросити на госпдоговірних умовах компетентну організацію (виконавця) для детального аналізу проблеми.

### **1.6. Опис системи. Визначення вхідних (екзогенних), вихідних (ендогенних) і керівних змінних системи**

Запрошений виконавець, вивчивши доступну інформацію, визначив:

- **екзогенними змінними для зимового періоду є:**
  - а) об'єм озера;
  - б) температура води;
  - в) середня швидкість течії в озері;
  - г) витрата річкової притоки  $Q_r$  (м<sup>3</sup>/добу);
  - д) концентрація БСК в річковій притоці  $L_r$  (г/м<sup>3</sup>);
  - е) концентрація РК в річковій притоці  $O_2 r$  (г/м<sup>3</sup>);
- **ендогенними змінними для зимового періоду є:**
  - а) концентрація РК в озері –  $O_2$  (г/м<sup>3</sup>);
  - б) частота  $f$  заморних явищ (1/рік);
  - в) тяжкість заморних явищ -  $B$  (центнер/рік);
- **вирішальними змінними для зимового періоду є:**
  - а) витрата стічних вод -  $Q_{st}$  (м<sup>3</sup>/добу);
  - б) концентрація БСК -  $L_{st}$  (г/м<sup>3</sup>) і
  - в) концентрація РК -  $O_{2st}$  (г/м<sup>3</sup>) в стічних водах пгт. Приозерне;
  - г) активна площа вільної поверхні озера –  $S_s$  (м<sup>2</sup>);
  - д) активна площа донних відкладень озера –  $S_b$  (м<sup>2</sup>).

Основне призначення аналізу – набути найбільш бажані значення вирішальних змінних.

Екзогенні змінні – це вхідні чинники, що не змінюються при функціонуванні системи. Ендогенні змінні – це вихідні змінні або змінні стани системи. Основне призначення аналізу – отримати найбільш бажані значення вирішальних змінних.

### 1.7. Перерахування можливих варіантів рішення

Виконавець пропонує шукати можливі варіанти вирішення проблеми заморів риби в озері серед наступних можливостей:

- а) зменшення концентрації БСК -  $Lst$  (г/м<sup>3</sup>) в стічних водах пмт. Приозерне;
- б) збільшення активної площі вільної поверхні озера за рахунок аерації –  $Ss$  (м<sup>2</sup>).

### 1.8. Оцінка майбутніх умов, що включає прогнози відносно змінних і змін в техніці

Вважається, що в майбутньому не відбудеться помітних змін щодо змінних (моделі) і технічних можливостей вирішення проблеми.

На етапі постановки завдання отримано якісний опис проблеми і системи (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 - Варіанти впливу

№ заходу	Вид заходу	
	Штучна аерація	Інтенсифікація очищення стічних вод
	Активна площа вільної поверхні озера в зимовий період, м <sup>2</sup>	Додатковий ступінь очищення стічних вод від БСК, %
1	10000	0
2	30000	0
3	50000	0
4	100000	0
5	0	5
6	0	10
7	0	15
8	0	20
9	0	25
10	10000	5
11	30000	10
12	50000	15
13	70000	20
14	100000	25

## 6. Методологія моделювання і аналізу

### 6.1. Моделювання і аналіз

Якщо на етапі постановки завдання отримують якісний опис проблеми, то на етапі моделювання якісне уявлення переходить в кількісне. На цьому етапі виникають функціональні залежності між змінними, і для кожного варіанта рішення і набору вхідних даних визначаються вихідні дані системи. Існують різні форми подання цих залежностей, такі як рівняння, графіки або таблиці з чисельними значеннями змінних. Однією з основних цілей моделювання є надання допомоги дослідникові системи і особі, яка приймає рішення, в отриманні яснішого уявлення про взаємозв'язки між різними елементами системи.

Аналіз починають із збору інформації, яка може бути використана для визначення залежностей між змінними. По можливості ці залежності слід перевіряти на точність, крім того, необхідно виявити характер впливу будь-якої невизначеності в параметрах на кінцевий результат. Ці операції перераховані в табл. 6.1. У наступному розділі проводиться розгляд різних аспектів моделювання в послідовності, вказаній в таблиці. Першою операцією моделювання є збір інформації, яку можна використовувати для знаходження кількісних зв'язків між змінними. Інформація може бути отримана з літературних джерел, на підставі думок експертів або за наслідками експериментів, що проводяться самим дослідником системи або за його замовленням.

Таблиця 6.1 - Операції, що виконуються на етапі моделювання

1	Збір інформації для встановлення кількісних взаємозв'язків між змінними
2	Конкретизація кількісних взаємозв'язків між змінними
3	Перевірка встановлених взаємозв'язків між змінними
4	Оцінка допущень і виявлення невизначеностей

*Використання наявних статистичних даних.*

Дослідник має ряд труднощів, пов'язаних з використанням наявних даних. Одна з труднощів обумовлена тим, що наявні дані, як правило, збиралися не у зв'язку з тією проблемою, якою займається дослідник, тому для нього ці дані

можуть виявитися непридатними.

Інша трудність, пов'язана з використанням наявних даних, обумовлена відмінністю способів їх отримання, що є важливим чинником при будь-якому зборі інформації. Наприклад, є підстави вважати, що підвищення тяжкості злочинів, що повідомляється у пресі, принаймні частково є наслідком нових методів повідомлень про злочини і їх описів. При порівнянні статистичних даних, отриманих в різний час, або в різних місцях, або різними людьми, слід враховувати різницю в методах збору даних.

Ще одна трудність у використанні статистичних даних обумовлена ступенем точності наявної інформації. Кожен експеримент вносить збудження в середовище, і тому не виключені помилкові висновки щодо стану середовища у відсутність експерименту. Крім того, метод вимірювання вносить невизначеність в отримувані дані, оскільки в принципі неможливо включити в модель відразу все населення або виміряти будь-яку змінну з абсолютною точністю. Нарешті, проміжок часу між збором даних і їх використанням вносить невизначеності через залежність змінних від часу.

***На етапі моделювання якісне подання проблеми і/або системи переводять в кількісний опис.***

#### ***6.1.1. Збір інформації для встановлення кількісного взаємозв'язку між змінними (елементами системи)***

Виконавець провів збір доступної інформації і додаткові дослідження для встановлення кількісного взаємозв'язку між змінними (елементами системи).

#### ***6.1.2. Побудова моделі системи; конкретизація кількісних взаємозв'язків між змінними***

Виконавець, провівши збір доступної інформації, лабораторні і натурні дослідження, здійснив калібрування і верифікацію застосування наступної моделі формування кисневого режиму в озері в зимовий період:

- вплив скидання міських стічних вод на вміст БСК у притоці:

$$\text{Lin}(\text{Qr}, \text{Lr}, \text{Lst}, \text{Qst}) := \frac{\text{Qr} \cdot \text{Lr} + \text{Qst} \cdot \text{Lst}}{\text{Qr} + \text{Qst}}$$

$$\text{Lin} := \text{Lin}(10^5 \cdot 2, 4, 20, 10000) \quad \text{Lin} = 4.7619$$

- вплив скидання міських стічних вод на вміст РК у притоці:

$$\text{O2in}(\text{Qr}, \text{O2r}, \text{O2st}, \text{Qst}) := \frac{\text{Qr} \cdot \text{O2r} + \text{Qst} \cdot \text{O2st}}{\text{Qr} + \text{Qst}}$$

$$\text{O2in} := \text{O2in}(10^5 \cdot 2, 8, 6, 10000) \quad \text{O2in} = 7.9048$$

- модель кисневого режиму озера в зимовий період:

$$\text{O2}(\text{S}_s, \text{S}_b, \text{Lin}, \text{O2in}) := \frac{\text{O2in} - 0.783 \cdot \text{Lin} + 9.959 \cdot 10^{-6} \cdot \text{S}_s - 4.21 \cdot 10^{-7} \cdot \text{S}_b}{1 + 7.193 \cdot 10^{-7} \cdot \text{S}_s}$$

$$\text{O2}(0, 4 \cdot 10^6, 4.7619, 7.9048) = 2.4922$$

- модель залежності частоти і тяжкості заморних явищ від кисневого режиму озера в зимовий період (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 - Залежність заморних явищ від вмісту РК

Зміст розчиненого кисню $\text{O}_2$ (г/м <sup>3</sup> )	Характеристика заморних явищ	
	Частота заморних явищ (1/рік)	Тяжкість заморних явищ (цт/рік)
$0 < \text{O}_2 \leq 2$	1	100
$2 < \text{O}_2 \leq 4$	0.4	10
$4 < \text{O}_2 \leq 6$	0.1	1
$6 < \text{O}_2 \leq 8$	0.01	0.1
$8 < \text{O}_2$	0	0

- модель вартості штучної аерації озера;

$$\text{P}(\text{S}_s) := 6 \cdot \sqrt{\text{S}_s} + 0.094 \text{S}_s$$

$$\text{P}(10^6) = 1 \cdot 10^5$$



- модель вартості підвищення ступеня очищення стічних вод від БСК:

$$P(S_L) := 1400 \cdot S_L$$

$$P(25) = 3.5 \cdot 10^4$$

### ***6.1.3. Перевірка встановлених взаємозв'язків між змінними***

Сенс цієї процедури полягає у забезпеченні впевненості в тому, що побудована модель відповідає (адекватна) реальному об'єкту. З цією метою Виконавець провів верифікацію моделі, яка полягає в тому, що результати тестового моделювання порівнюються з незалежними даними, якщо результати порівняння визнаються задовільними, то модель вважається адекватною об'єкту, що вивчається.

### ***6.1.4. Оцінка допущень і виявлення невизначеностей***

Ця процедура дозволила Виконавцю виключити ті зв'язки й елементи системи, які не мають істотного впливу на ендogenous (вихідні) змінні (виходи системи) або для яких неможливо побудувати достовірну модель. Використовуючи метод песимістичної і оптимістичної оцінок, Виконавець визначив поведінку системи в інтервалі можливих значень вхідних змінних. В цьому випадку можна було вибрати таке рішення, яке мало чутливо до змін невизначених змінних, а саме:

- підземний стік в озеро в зимовий період;
- поверхневий стік в озеро до льодоставу, включаючи вплив засміченості території.

## **6.2. Отримання інформації від експертів**

У деяких випадках може статися, що отримати функціональні залежності між вихідними і вхідними змінними неможливо через нестачу даних, тоді доводиться використовувати думку експертів. Крім того, експерти можуть надати дослідникові наступну допомогу:

- дати оцінку наявних даних з погляду їх надійності і застосовності;
- уточнити варіанти і змінні системи, що управляють;
- назвати показники, які можуть бути використані для кількісної характеристики загальних інтересів і цілей осіб, що входять в різні групи;

- вказати відносну важливість цілей і показників.

Наприклад, до мистецтвознавця можна звернутися з проханням назвати показники, придатні для вимірювання рівня творчої активності сучасних художників. Можливо, він запропонує включити в аналіз оцінку тематичної різноманітності й кількості творів художників. Крім того, він може запропонувати методи вимірювання різноманітності й кількості творів і висловити свою думку про відносну важливість цих двох змінних.

Для дослідника системи найбільш відповідним є експерт, якими якого є: здатність застосування знань для вирішення даної проблеми, уміння передбачити події з розумною точністю, уміння довести необхідну інформацію до особи, яка не є фахівцем, відносна безсторонність. Про здібності експерта судити важко. Щоб знати про них, необхідно взяти до уваги стаж роботи експерта за фахом, його публікації і академічні звання.

Оцінки експерта залежать від його упередженості. Наприклад, людина, зв'язана з тютюновою компанією, буде схильна не брати до уваги думку лікарів про шкідливість куріння. Аналогічно значущість думки експерта по транспорту знижується до мінімуму, якщо його працедавця цікавлять такі дії, які могли б привести до створення заторів транспорту. Це зовсім не означає, що такі люди нечесні. Річ у тому, що на їх апіорне переконання мимоволі впливають обставини, в яких ці люди знаходяться. Під апіорним переконанням мається на увазі думка особи або експерта до отримання яких-небудь додаткових даних. Як правило, об'єктивні дані можна інтерпретувати по-різному, під впливом свого апіорного переконання експерт може надати більше значення тим даним, які більше відповідають цьому переконанню.

## 7. Методологія оцінки результатів рішення

На цьому етапі дослідник намагається класифікувати можливі варіанти вирішення за ступенем їх переваги.

### 7.1. Визначення міри для кожного показника стану об'єкта

Мірою кожного показника може бути його якісний опис (впорядкування ознак і показників). При виборі шкали оцінок корисності (значущості) доцільно встановити інтервал можливих змін показника. Якнайкраще (найбільш прийнятне) значення зручно прийняти за одиницю, а найменш прийнятне – за нуль. Якнайкращого значення кожного показника можна набути, якби метою програми, що розробляється, була максимізація значення цього показника. Якнайгірше значення показника визначається його мінімальним значенням, яке ще могло б годитися для всіх зацікавлених сторін.

Важливість і складність цього етапу полягає в тому, що він завершальний. На цьому етапі необхідно дати не само єдине рішення, а вказати прийнятний шлях порівняння різних рішень (табл. 7.1).

Таблиця 7.1 - Наслідки варіантів впливу

<i>Економічний показник, <math>P</math>; <math>w_1=0,5</math></i>		<i>Вміст розчиненого кисню в озері, <math>O_2</math>; <math>w_1=0,1</math></i>		<i>Рекреаційна привабливість; <math>w_1=0,4</math></i>	
<i>величина, грн.</i>	<i>корисність</i>	<i><math>O_2</math>, г/м<sup>3</sup></i>	<i>корисність</i>	<i>ознака</i>	<i>Корис- ність, <math>u_3</math></i>
100000	0	$O_2 < 2$	0	втрата рибогоспо- дарської значущості	0
50000	0,2	$2 \leq O_2 < 4$	0,2	сильні замори	0,2
25000	0,5	$4 \leq O_2 < 6$	0,5	слабкі замори	0,5
10000	0,8	$6 \leq O_2 < 8$	0,8	практична відсутність заморів	0,8
0	1	$8 \leq O_2$	1	відсутність заморів	1

## **7.2. Об'єднання всіх показників в єдине уявлення або функцію, за якими можна вибрати найбільш бажаний варіант рішення**

Для вибору варіанта вирішення з конкретними значеннями вирішальних змінних необхідно перетворити векторний опис об'єкта (системи) в скалярний, названий цільовою функцією:

$$F = \sum_i w_i \cdot u_i ,$$

де  $u_i$  - оцінка корисності  $i$ -го показника;  $w_i$  - його відносна значущість; (повинна виконуватися умова  $\sum w_i = 1$ ). Для визначення  $w_i$  можна розташувати показники в ряд в передбачуваному порядку убуття важливості й провести попарне порівняння.

Якщо отримання єдиного набору вагових множників, що представляє однакову точку зору різних груп осіб, виявляється неможливим, то часто доцільно вказати домінуюче рішення для кожної сукупності наборів вагових множників.

Показники розбивають на три категорії (наприклад, економічні, соціальні й середові чинники). Можливі варіанти вирішення проблеми нумерують. Кожен показник при аналізі кожного варіанта вимірюють з використанням або певних одиниць вимірювання, або оцінок значущості. Отримані результати потім перетворюються в оцінки корисності (наприклад, за п'ятибальною шкалою). Наступним кроком визначають вагові множники для показників системи з умовою нормування  $\sum w_i = 100$ . Для кожного  $i$ -го плану обчислюють суму  $S_j = \sum_i w_i \cdot u_{ij}$  і визначають найбільш прийнятний варіант, відповідний даному набору вагових множників. Для представлення результатів дослідження ОПР різні набори вагових множників і домінуючий варіант рішення відображають на площині у вигляді трикутника точок зору, для чого і необхідне угруповання показників за трьома категоріями. На трикутнику від вершини до протилежної сторони значущість відповідного чинника убиває від 100 до 0%.

## **8. Моделі. Види моделей. Матеріальні моделі**

Модель – це уявний або реальний об'єкт, що являє собою реальний об'єкт у вигляді, зручному для його вивчення, і зберігає основні риси реального процесу або об'єкта, що підлягають моделюванню.

Модель повинна враховувати необхідні екзогенні, ендогенні змінні реального процесу, а також ті, що управляють.

Всі моделі діляться на дві великі групи:

- моделі матеріальні, що втілюються в матеріальних об'єктах;
- моделі ідеальні (уявні).

Матеріальні моделі бувають двох видів:

- фізичні;
- аналогові.

Вони мають матеріальне втілення.

Фізичні моделі – це моделі, які мають однакову з реальним об'єктом або процесом фізичну природу, тобто підкоряються однаковим фізичним законам, і зберігають комплекс властивостей реального об'єкта.

Побудова фізичних моделей здійснюється на основі принципу подібності. Подібними називаються об'єкти навколишнього середовища, у яких параметри, що визначають модельовані параметри стану, розрізняються у будь-який момент часу і в будь-якій точці простору в однакову кількість разів, названу масштабом подібності.

Результати, отримані на фізичних моделях, дуже правдоподібні. Проте фізичним моделям властиві й деякі істотні недоліки, а саме:

- висока вартість і трудомісткість побудови;
- для кожного нового модельованого об'єкта необхідно створювати нову фізичну модель;

- при зміні будь-яких параметрів моделі її необхідно переробляти або перенастроювати;
- фізичне моделювання можна виконати тільки в тих випадках, коли можна забезпечити дотримання принципу подібності модельованих властивостей об'єкта або процесу.

Аналогові моделі - це моделі, які мають з реальним об'єктом різну фізичну природу, проте підкоряються схожим (аналогічним) закономірностям, тобто є квазіізоморфними реальному об'єкту.

Ізоморфізм припускає, що різні за фізичними властивостями природні об'єкти можуть мати однакові властивості, які не залежать від фізичної природи об'єктів, а залежать тільки від їх структури. Принцип аналогії припускає, що якщо два різних об'єкти мають яку-небудь схожість, то на підставі цього можна зробити висновки про схожість зв'язаних з ними станів цих об'єктів.

Переконливою підставою для твердження про наявність аналогії між двома об'єктами різної фізичної природи, один з яких підлягає моделюванню, є схожість математичного опису.

Наприклад, перенесення тепла в суцільному нерухомому середовищі описується законом Фур'є, який має вигляд

$$q = -j \cdot \frac{\partial T}{\partial x},$$

де  $q$  - питомий потік тепла (дж/м<sup>2</sup>\*с);

$j$  - коефіцієнт теплопровідності (дж/м\*с\* °K);

$T$  - температура середовища (°K);

$x$  - координата в напрямі потоку тепла (м).

Аналогічним фізичному закону підкоряється процес дифузії домішки в нерухомому середовищі:

$$q_M = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x},$$

де  $q_M$  - питомий потік маси домішки ( $\text{г/м}^2 \cdot \text{с}$ );

$D$  - коефіцієнт дифузії ( $\text{м}^2/\text{с}$ );

$C$  - концентрація домішки ( $\text{г/м}^3$ );

$x$  - координата в напрямі потоку маси домішки (м).

У цих двох процесів різна фізична природа, але однакові за вираженням фізичні закони.

Найчастіше як аналогову модель цих процесів (перенесення тепла або дифузії речовин) використовують електричну модель, засновану на законі Ома:

$$i = -\sigma \cdot \frac{\partial u}{\partial x},$$

де  $i$  - щільність електричного струму в нерухомому електропровідному середовищі ( $\text{ампер/м}^2$ );

$\sigma$  - електропровідність середовища ( $\text{ампер/вольт} \cdot \text{м}$ );

$u$  - електричний потенціал в середовищі (вольт);

$x$  - координата у напрямі електричного струму (м).

Подібність наведених формул забезпечує можливість моделювання цих процесів за допомогою електричних моделей, які досить просто реалізувати в лабораторних умовах.

До переваг аналогових моделей можна віднести:

1. За допомогою одного фізичного пристрою можна моделювати об'єкти різної фізичної природи.
2. Зміна параметрів модельованого процесу не вимагає створення нової моделі, досить змінити параметри вже наявної моделі.

## 9. Принцип матеріального балансу й побудова балансових моделей

Принцип матеріального балансу є наслідком фундаментального закону збереження кількості речовини, згідно з яким будь-яка речовина не виникає з нічого і не зникає без сліду, але тільки переміщується у просторі, перетворюється в інші речовини або утворюється з інших речовин. Математичним виразом принципу матеріального балансу певної речовини в елементі системи є рівняння

$$\dot{m} \equiv \frac{dm}{dt} = j + R^{(+)} - R^{(-)},$$

де  $m$  - маса речовини в елементі,  $R^{(+)}$  - швидкість реактивного утворення речовини,  $R^{(-)}$  - швидкість реактивного перетворення речовини.

Якщо мірою величини елемента системи є його маса  $M$ , тобто маса усіх речовин, що його складають, то матеріальний баланс для елемента в цілому відображується рівнянням

$$\dot{M} \equiv \frac{dM}{dt} = J,$$

де  $J$  - сумарний (повний) потік маси усіх речовин до елемента системи, що також може бути додатним, від'ємним або нульовим.

Реакції, що протікають в елементі, не впливають на його повну масу. Надалі саме масові частки речовин приймаються за міру їх вмісту в елементах систем, що розглядаються.

Рівняння відносно вмісту (масової частки) речовини в елементі:

$$\dot{C} = j^{(n)} - J^{(n)}C + r^{(+)} - r^{(-)},$$
$$j^{(n)} = \frac{j}{M}; J^{(n)} = \frac{J}{M}; r^{(+)} = \frac{R^{(+)}}{M}; r^{(-)} = \frac{R^{(-)}}{M},$$

де  $j^{(n)}$  і  $J^{(n)}$  - питомий (на одиницю маси елемента) потік речовини і питомий сумарний потік усіх речовин до елемента, а  $r^{(+)}$  та  $r^{(-)}$  є питомі швидкості реакцій утворення та перетворення речовини, що відбуваються в елементі системи.



## 10. Принцип “чорного ящика” й побудова статистичних моделей

Параметрами статистичних моделей є статистики, тобто параметри системи, побудовані безпосередньо за даними спостережень.

У широкому розумінні статистичний підхід має давати відповідь на запитання:

1) чи є детерміновані зв'язки, які називають *трендами*, між величинами за даними їх спостережень, що складають *вибірку*?

2) яка структура цих зв'язків (трендів), а саме що, від чого і яким чином залежить?

3) як найкраще визначити параметри ідентифікованих залежностей, щоб відокремити тренди від прояву випадкових факторів, який називають *шумом*?

4) які характеристики має шум?

Процедури, що застосовуються у пошуку відповідей на перші два запитання, складають етап ідентифікації статистичної моделі.

Пошук відповідей на останні два запитання складають процедури етапу налагоджування статистичної моделі.

Проста статистична модель для вибірки обсягу  $n$ :  $a_1, a_2, \dots, a_n$  спостережень (вимірювань) фізичної величини:

- вибіркове середнє: 
$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_n ;$$

- вибіркова дисперсія: 
$$D_a = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( a_n - \bar{a} \right)^2 ;$$

- вибіркове стандартне відхилення: 
$$\sigma = \sqrt{D_a} .$$

Емпірична функція розподілу ймовірностей фізичної величини:

$$P(a \leq \tilde{a}_i) = \frac{i}{n+1},$$

де  $\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n$  - варіаційний ряд.

Лінійна регресія (лінійний тренд) виду  $y(x) = \theta \cdot x + e$ .

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2},$$

де  $x_1, x_2, \dots, x_n$  - вибірка вимірювань фізичної величини  $X$ ;  $y_1, y_2, \dots, y_n$  - вибірка вимірювань фізичної величини  $Y$ , що вважається лінійно залежною від величини  $X$ ,  $e$  - вплив випадкових факторів.

## 11. Застосування обчислювальної техніки в системному аналізі

Можливості наукового калькулятора, щодо виконання розрахунків за динамічними й статистичними моделями дозволяють отримувати результати, якщо розрахункові залежності є досить простими.

Можливості програмних пакетів Microsoft Excel<sup>®</sup> або MathCAD<sup>®</sup> щодо можливостей динамічного й статистичного моделювання дозволяють отримувати результати, якщо розрахункові залежності є складними.

## **12. Експертні методи системного аналізу**

### **12.1. Умови використання експертних оцінок в системному аналізі**

Безперечно, що для ухвалення обґрунтованих рішень необхідно спиратися на досвід, знання і інтуїцію фахівців. Після Другої світової війни в рамках теорії управління (менеджменту) почала розвиватися самостійна дисципліна - експертні оцінки. Методи експертних оцінок - це методи організації роботи з фахівцями-експертами і обробки думок експертів, виражених в кількісній і/або якісній формі з метою підготовки інформації для ухвалення рішень.

Для проведення роботи за методом експертних оцінок створюють робочу групу, яка і організовує за дорученням ОПР діяльність експертів, об'єднаних (формально або по суті) в експертну комісію (ЕК). Існує маса методів отримання експертних оцінок. В одних (наприклад, метод Делфі) з кожним експертом працюють окремо, він навіть не знає, хто ще є експертом, тому висловлює свою думку незалежно від авторитетів. В інших (наприклад, метод "мозкового штурму") експертів збирають разом для підготовки матеріалів для ОПР, при цьому експерти обговорюють проблему один з одним, вчать один у одного, невірні думки відкидаються. В одних методах число експертів фіксоване і таке, щоб статистичні методи перевірки узгодженості думок і потім їх усереднювання дозволяли ухвалювати обґрунтовані рішення. В інших - число експертів росте в процесі проведення експертизи (наприклад, при використанні методу "сніжної грудки").

### **12.2. Основні проблеми теорії і практики експертних оцінок**

Що повинна представити експертна комісія в результаті своєї роботи - інформацію для ухвалення рішення ОПР або проект самого рішення? Від відповіді на це методологічне питання залежить організація роботи комісії.

***Мета - збір інформації для ОПР.***

Тоді робоча група повинна зібрати якомога більше інформації, що відноситься до справи, аргументів "за" і "проти" певних варіантів рішень. Корисний метод

поступового збільшення числа експертів: спочатку перший експерт приводить свої міркування з даного питання; складений ним матеріал передається другому експертові, який додає свої аргументи; накопичений матеріал поступає до наступного, третього експерта... Процедура закінчується, коли вичерпується потік нових міркувань. Відзначимо, що експерти в даному методі тільки поставляють інформацію, аргументи "за" і "проти", але не виробляють узгодженого проекту рішення. Немає ніякої необхідності прагнути до того, щоб експертні думки були узгоджені між собою. Більше того, найбільшу користь приносять експерти з мисленням, що відхиляється від масового, оскільки саме від них слід чекати найбільш оригінальних аргументів.

### ***Мета - підготовка проекту рішення для ОПР.***

Математичні методи в експертних оцінках застосовують звичайно саме для вирішення завдань підготовки проекту рішення. При цьому часто некритично приймають догми узгодженості й одновимірності. Ці догми "кочують" з однієї публікації в іншу, тому доцільно їх обговорити.

**ДОГМА УЗГОДЖЕНОСТІ.** Вважається, що рішення може бути ухвалене лише на основі узгоджених думок експертів. Тому виключають з експертної групи тих, чия думка відрізняється від думки більшості. При цьому виключаються як некваліфіковані особи, які потрапили до складу експертної комісії через непорозуміння або з міркувань, що не мають відношення до їх професійного рівня, так і найбільш оригінальні мислителі, які глибше проникли в проблему, чим більшість. Слід було б з'ясувати їх аргументи, надати їм можливість для обґрунтування їх точок зору. Замість цього їх думкою нехтують.

Буває і так, що експерти діляться на дві або більше групи, що мають єдині точки зору. Так, при оцінці результатів науково-дослідних робіт (НДР) можуть скластися дві групи: "теоретиків", що явно віддають перевагу НДР, в яких отримані теоретичні результати, і "практиків", що вибирають ті НДР, які дозволяють отримувати безпосередні прикладні результати.

Іноді заявляють, що коли виявлені дві або більше групи експертів (замість однієї узгодженої в думках) опит не досяг мети. Це не так! Мета досягнута -

встановлено, що єдиної думки немає. І ОПР має це враховувати. Прагнення забезпечити узгодженість думок експертів будь-якою ціною може приводити до свідомого одностороннього підбору експертів, ігнорування всіх точок зору, окрім однієї робочої групі, що найбільш подобається ОПР.

**ДУМКИ ДИСИДЕНТІВ.** З метою штучно добитися узгодженості прагнуть зменшити вплив думок експертів-дисидентів. Жорсткий спосіб боротьби з дисидентами полягає в їх виключенні зі складу експертної комісії. Вибраковування експертів, як і вибраковування результатів спостережень, що різко виділяються, приводить до процедур, які мають погані або невідомі статистичні властивості.

М'який спосіб боротьби з дисидентами полягає в застосуванні стійких статистичних процедур. Простий приклад: якщо відповідь експерта - дійсне число, то думка дисидента, що різко виділяється, сильно впливає на середнє арифметичне відповідей експертів і не впливає на їх медіану. Тому розумно як узгоджену думку розглядати медіану. Проте при цьому ігноруються (не досягають ОПР) аргументи дисидентів.

У будь-якому з двох способів боротьби з дисидентами ОПР позбавляється інформації, що йде від дисидентів, а тому може ухвалити необґрунтоване рішення, яке приведе до негативних наслідків. З іншого боку, представлення ОПР всього набору думок знімає частину відповідальності і праці з підготовки остаточного рішення з комісії експертів і робочої групи з проведення експертного опиту і перекладає її на плечі ОПР.

### **12.3. Догма одновимірності**

Поширений досить примітивний підхід "кваліметрії", згідно з яким об'єкт завжди можна оцінити одним числом. Оцінювати людину одним числом приходило в голову тільки на невільничих ринках. Навряд чи навіть найзавзятіші кваліметристи розглядають книгу або картину як еквівалент числа - її "ринковій вартості".

Кожен об'єкт можна оцінювати за багатьма показниками якості. Наприклад, легковий автомобіль можна оцінювати за такими показниками: витрата бензину на

100 км шляху (в середньому); надійність (середня вартість ремонту за рік); швидкість набору швидкості 100 км/год після початку руху; максимальна швидкість, що досягається; тривалість збереження в салоні позитивної температури при низькій зовнішній температурі і вимкненому двигуні; вага і т. д.

Чи можна звести оцінки за цими показниками разом? Визначає є конкретна ситуація, для якої вибирається автомашина. Швидкість, що максимально досягається, важлива для гонщика, але не має великого практичного значення для водія рядової приватної машини. Для такого водія важливіше витрата бензину і надійність. Для машин різних служб державного управління надійність важливіша, ніж для приватника, а витрата бензину - навпаки. Для районів Крайньої Півночі важлива теплоізоляція салону, а для південних районів - ні.

Таким чином, важлива конкретна (вузька) постановка завдання перед експертами, але такої постановки часто немає, тоді виникають спроби розробки узагальненого показника якості, наприклад, у вигляді лінійної функції від перерахованих змінних. Альтернативою єдиному узагальненому показнику є математичний апарат типу багатокритерійної оптимізації - множина Парето і т. д.

У деяких випадках таки можна глобально порівняти об'єкти - наприклад, за допомогою тих же експертів отримати впорядкування даних об'єктів - виробів або проектів. Тоді можна підібрати коефіцієнти при окремих показниках так, щоб впорядкування за допомогою лінійної функції можливо точніше відповідало глобальному впорядкуванню. Навпаки, в подібних випадках не слід оцінювати вказані коефіцієнти за допомогою експертів. Ця ідея до цих пір не стала очевидною для окремих укладачів методик щодо проведення експертних опитів і аналізу їх результатів. Вони наполегливо прагнуть змусити експертів робити те, що вони виконати не в змозі - вказувати ваги, з якими окремі показники якості повинні входити в підсумковий узагальнений показник. Експерти зазвичай можуть порівняти об'єкти або проекти в цілому, але не можуть вичленувати внесок окремих чинників. Якщо організатори опиту питають, експерти відповідають, але ці відповіді не несуть в собі надійної інформації про реальність...

## **12.4. Основні стадії експертного опиту**

Як показує досвід проведення експертних досліджень, доцільно виділяти наступні стадії експертного опиту:

- 1) формулювання ОПР мети експертного опиту;
- 2) підбір ОПР основного складу робочої групи (звичайно - керівника і секретаря);
- 3) розробка робочою групою і затвердження у ОПР технічного завдання на проведення експертного опиту;
- 4) розробка робочою групою докладного сценарію проведення збору і аналізу експертних думок (оцінок), включаючи як конкретний вид експертної інформації (слова, умовні градації, числа, ранжування, розбиття або інші види об'єктів нечислової природи), так і конкретні методи аналізу цієї інформації (обчислення медіани Кемені, статистичний аналіз люсіанів та інші методи статистики об'єктів нечислової природи і інших розділів прикладної статистики);
- 5) підбір експертів відповідно до їх компетентності;
- 6) формування експертної комісії (доцільне укладення договорів з експертами про умови їх роботи і її оплати, затвердження ОПР складу експертної комісії);
- 7) проведення збору експертної інформації;
- 8) аналіз експертної інформації;
- 9) при застосуванні процедури з декількох турів - повторення двох попередніх етапів;
- 10) інтерпретація отриманих результатів і підготовка висновку для ОПР;
- 11) офіційне закінчення діяльності робочої групи (зокрема підготовка і затвердження наукового і фінансового звітів про проведення експертного дослідження, оплата праці експертів і співробітників робочої групи).

## **12.5. Підбір експертів**

Проблема підбору експертів є однієї з найбільш складних. Очевидно, експертами необхідно обирати тих людей, чиї думки найбільш допоможуть ухваленню адекватного рішення. Але як виділити, знайти, підібрати таких людей?

Треба прямо сказати, що немає методів підбору експертів, що напевно забезпечують успіх експертизи.

Часто пропонують використовувати методи взаємооцінки і самооцінки компетентності експертів. З одного боку, хто краще може знати можливості експерта, ніж він сам? З іншого боку, при самооцінці компетентності швидше оцінюється ступінь самовпевненості експерта, ніж його реальна компетентність. Тим більше, що само поняття "компетентність" строго не визначене. Можна його уточнювати, виділяючи складові, але при цьому ускладнюється попередня частина діяльності експертної комісії.

При використанні методу взаємооцінки, крім можливості прояву особових і групових симпатій і антипатій, відіграє роль непоінформованість експертів про можливості один одного. У сучасних умовах достатньо хороше знайомство з роботами і можливостями один одного може бути тільки у фахівців, які багато років працюють разом. Проте залучення таких пар фахівців не дуже доцільне, оскільки вони схожі один на одного.

Використання формальних показників (посада, науковий ступінь і вчене звання, стаж, число публікацій...), очевидно, може мати допоміжний характер. Успішність участі в попередніх експертизах - хороший критерій для діяльності дегустатора, лікаря, судді в спортивних змаганнях, тобто таких експертів, які беруть участь в довгих серіях однотипних експертиз. Проте, на жаль, найцікавішими й важливішими є унікальні експертизи великих проектів, що не мають аналогів.

У випадку, якщо процедура експертного опиту припускає спільну роботу експертів, велике значення мають їх особисті якості. Один "балакун" може паралізувати діяльність всієї комісії. У подібних випадках важливе дотримання регламенту роботи, розробленого робочою групою.

Є корисний метод "сніжної грудки", при якій від кожного фахівця, що залучається як експерт, отримують декілька прізвищ тих, хто може бути експертом з даної тематики. Очевидно, деякі з цих прізвищ зустрічалися раніше в діяльності РГ, а деякі - нові. Процес розширення списку зупиняється, коли нові прізвища перестають зустрічатися. У результаті виходить достатньо обширний список



можливих експертів. Ясно, що коли на першому етапі всі експерти були з одного "клану", то і метод "сніжної грудки" дасть, скоріш за все, осіб з цього "клану", а думки і аргументи інших "кланів" будуть упущені.

Слід підкреслити, що підбір експертів кінець кінцем - функція робочої групи, і ніякі методики підбору не знімають з неї відповідальності. Іншими словами, саме на робочій групі лежить відповідальність за компетентність експертів, за їх принципову здатність вирішити поставлене завдання. Важливою є вимога до ОПР про затвердження списку експертів. Існує ряд нормативних документів, що регулюють діяльність експертних комісій в тих або інших областях. Прикладом є Закон Російської Федерації "Про екологічну експертизу" від 23 листопада 1995 р., в якому регламентується процедура експертизи "наміченої господарської або іншої діяльності" з метою виявлення можливої шкоди, яку вона може нанести природному середовищу.

## **12.6. Метод “мозкового штурму”**

1. Призначається людина (ведучий), яка веде нараду і стежить за дотриманням правил цього методу.
2. Визначаються учасники (учасник) наради, які фіксують заяви експертів.
3. Учасників наради детально інформують про проблему, яку необхідно вирішити.

*Етап 1.* Збір можливих варіантів вирішення проблеми.

На цьому етапі кожен учасник наради зобов'язаний запропонувати одне або декілька вирішень проблеми. Слово надається учасникам, починаючи від “юнга” і закінчуючи “капітаном”. Ведучий наради стежить за тим, щоб ніяка пропозиція, якою б вона не здавалася абсурдною іншим учасникам наради, не піддавалася критиці з боку присутніх і була б включена в підсумковий список способів вирішення проблеми. Всі пропозиції експертів фіксують у письмовій формі.

*Етап 2.* Ведучий і фахівець з проблеми класифікують пропозиції експертів, не опускаючи жодного з них. Висловлені пропозиції фіксуються письмово в кількості екземплярів за числом експертів для проведення наступної наради. Ці екземпляри надають експертам перед наступним засіданням для аналізу, критичних зауважень і оцінки їх ефективності.

*Етап 3.* На завершальній нараді детально обговорюють подані пропозиції, оцінюють їх ефективність і доцільність. Ухвалюють найбільш прийнятне рішення.

### **12.7. Метод Делфі**

Застосовується для досягнення єдиної думки, коли між експертами в одній і тій же області знань є істотні розбіжності.

*Стадії методу Делфі:*

1. Кожному експертові пропонується анонімно заповнити анкету, в якій він висловлює свої думки з поставлених питань і їх обґрунтування.

2. Ця інформація розмножується у вигляді збірки думок всіх експертів і надаються їм з проханням переглянути свої анкетні позиції у світлі нових даних.

3. Стадії 1 і 2 повторюються декілька разів.

Можна сподіватися, що такий обмін думками при декількох ітераціях приведе до єдиної думки (або до відносно малої розбіжності думок).

## Список джерел

1. Пэнтл Р. Методы системного анализа окружающей среды. – М.: Мир, 1979. – 214 с.
2. Прокопенко А.И. Вайнер В.Г., Галкин В.Л. Экономико-экологическое моделирование: Уч. пособие. - Х.: АО “Бизнес Информ”, 1997. - 360 с.
3. Примак А.В., Кафаров В.В., Качиашвили К.И. Системный анализ контроля и управления качеством воды и воздуха. - К.: Наук. думка, 1991.- 360 с.
4. Математические методы контроля загрязнения воды / Под ред. А. Джеймса. – М.: Мир, 1981.- 172 с.
5. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. - СПб.: Изд. СПбГТУ, 1997. - 510 с.
6. Кузнецов О.Л., Кузнецов П.Г., Большаков Б.Е. Система природа-общество-человек: Устойчивое развитие. - ВНИИГеосистем; Университет "Дубна", 2000.
7. Лямец В.И., Тевяшев А.Д. Системный анализ. – Х.: ХТУРЭ, 1998. - 252 с.
8. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. — М.: Высш. шк., 1989.
9. Губанов В.А. и др. Введение в системный анализ: Уч. пособие / Под ред. Л.А. Петросяна. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1988.
10. Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем. - М.: Мысль, 1978.
11. Шабалин Л.И. Система самоорганизации природы. - Новосибирск, 1998.
12. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. - М.: Наука, 1981.
13. Уемов А.И. Методы построения и развития общей теории систем. - М.: Наука, 1971.
14. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Системний аналіз» (для студентів 2 курсу денної і 3 курсу заочної форм навчання спеціальності 6.070800 – "Екологія та охорона навколишнього природного середовища"). Укл.: Бараннік В.О., Дмитренко Т.В. – Х.: ХНАМГ, 2007. – 6 с.

## **НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ**

**Бараннік Валерій Олександрович,  
Дмитренко Тетяна Володимирівна**

Конспект лекцій з дисциплін “Системний аналіз довкілля”, “Системний аналіз” (для студентів 2 курсу денної і 3 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.040106 “Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування”)

Редактор М. З. Аляб'єв

Комп'ютерне верстання Ю. П. Степась

План 2009, поз. 37Л

---

Підп. до друку 05.12.2010  
Друк на ризографі  
Тираж 50 пр.

Формат 60x84 1/16.  
Ум. друк. арк. 1,9  
Зам. №

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 731 від 19.12.2001