



Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна



АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ ТА ОБ'ЄКТАХ

Конспект лекцій

для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти
спеціальності G3 Електрична інженерія



Харків – 2026

УДК 621.7(075.8)

Рецензенти:

Канюк Г.І. – д.т.н., професор, завідувач кафедру автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна;

Шевченко С.Ю. – д.т.н., професор, завідувач кафедру передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківській політехнічний інститут»;

*Затверджено до друку рішенням вченої ради навчально-наукового інституту
«Українська інженерно-педагогічна академія»
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 5 від 19. 03. 2026 р.)*

Чернюк А.М.

Аналіз і моделювання процесів в електричних системах та об'єктах: конспект лекцій / уклад. А.М. Чернюк, С.М. Войтенко. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2026. – 217 с.

Конспект лекцій підготовлено відповідно до робочої програми навчальної дисципліни «Аналіз і моделювання процесів в електричних системах та об'єктах», яка входить до циклу професійної підготовки здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності G3 «Електрична інженерія» освітньо-професійної програми «Електричні станції, мережі та системи».

Навчальна дисципліна спрямована на розвиток навичок системного мислення та використання сучасних інструментів моделювання. Основний акцент робиться на поєднанні теоретичних знань із практичними підходами до аналізу електричних систем. Дисципліна забезпечує підготовку до вирішення науково-технічних проблем у сфері енергетики. Її результатом є здатність студентів застосовувати моделювання для підвищення ефективності та надійності електроенергетичних об'єктів.

ISBN 978-966-285-347-6

УДК 339.9(477)(075.8)

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, 2026.
© Чернюк А.М., Войтенко С.М., 2026.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	4
Тема 1. Вступ. Характеристика дисципліни	7
Тема 2. Загальні поняття аналізу	9
Тема 3. Види та етапи аналізу	12
Тема 4. Системний аналіз в енергетиці	19
Тема 5. Аналіз науково-технічної проблеми	33
Тема 6. Методи та засоби аналізу	60
Тема 7. Використання у системних дослідженнях знань і досвіду спеціалістів	72
Тема 8. Методи прийняття рішень в складних системах	82
Тема 9. Основні поняття моделювання. Властивості моделі	93
Тема 10. Види моделювання	107
Тема 11. Фізичне моделювання	112
Тема 12. Моделювання та оптимізація режимів в електричних системах	143
Тема 13. Математичне моделювання електричних мереж та систем	149
Тема 14. Засоби комп'ютерного моделювання	168
Тема 15. Лабораторне моделювання	188
Тема 16. Інтерпретація результатів лабораторного моделювання	200
РЕКОМЕНДОВНА ЛІТЕРАТУРА	217

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1. Загальні засади та актуальність

Сучасна електроенергетика перебуває у стані глибокої трансформації, що зумовлена переходом до концепції Smart Grid, широким використанням відновлюваних джерел енергії, розвитком систем накопичення та інтеграцією цифрових технологій. У цих умовах здобувачі другого магістерського рівня повинні володіти не лише традиційними знаннями про електричні системи, але й сучасними методами аналізу та моделювання процесів, які дозволяють прогнозувати поведінку складних енергетичних об'єктів, оцінювати їхню ефективність та надійність, а також приймати обґрунтовані інженерні рішення.

Дисципліна формує у студентів здатність працювати з багатокомпонентними системами, враховувати взаємозв'язки між електричними, тепловими, механічними та інформаційними процесами, що є критично важливим для сучасної інженерної практики. Вона забезпечує підготовку до вирішення завдань, які виникають у сфері проектування, експлуатації та оптимізації енергетичних систем.

2. Науково-технічна значущість

Моделювання процесів в електричних системах є фундаментом для:

Дослідження режимів роботи енергосистеми – від нормальних до аварійних;

Оптимізації параметрів обладнання та вибору раціональних схем;

Прогнозування розвитку енергетичних мереж з урахуванням інтеграції нових технологій;

Оцінки якості електричної енергії та впливу різних факторів на її стабільність;

Розробки інноваційних рішень у сфері автоматизації та цифрового керування.

Для магістрантів спеціальності G3 Електрична інженерія ця дисципліна є ключовою, адже вона поєднує теоретичні основи з практичними інструментами, що використовуються у сучасних дослідженнях та промислових проектах.

3. Освітня та професійна цінність

Вивчення дисципліни сприяє:

- формуванню системного мислення, необхідного для роботи з комплексними енергетичними об'єктами;
- розвитку навичок роботи з сучасними програмними пакетами моделювання та аналізу;
- підготовці до науково-дослідної діяльності, включно з написанням магістерських робіт та участю у міжнародних проєктах;
- забезпеченню конкурентоспроможності випускників на ринку праці, де цінується здатність працювати з цифровими моделями та симуляціями.

Таким чином, дисципліна є не лише академічним компонентом, але й інструментом професійної самореалізації.

4. Практичне значення

Здобувачі отримують можливість:

Виконувати моделювання електричних мереж різного рівня складності;

Розробляти оптимальні режими роботи обладнання;

Використовувати результати моделювання для прийняття управлінських рішень у сфері енергетики.

Ці компетентності є базовими для роботи у компаніях, що займаються проектуванням, експлуатацією та модернізацією енергетичних систем, а також для наукових установ, які досліджують нові технології.

Дисципліна «Аналіз і моделювання процесів в електричних системах та об'єктах» має стратегічне значення для підготовки магістрів спеціальності G3 Електрична інженерія. Вона забезпечує:

Грунтовні знання про закономірності функціонування енергетичних систем;

Практичні навички моделювання та оптимізації;

Підготовку до науково-технічної діяльності та професійної кар'єри;

Формування компетентностей, необхідних для інтеграції у міжнародний інженерний простір.

Таким чином, вивчення цієї дисципліни є необхідною умовою для формування висококваліфікованих фахівців, здатних вирішувати складні завдання сучасної електроенергетики та сприяти її сталому розвитку.

ЛЕКЦІЯ 1 ВСТУП. ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЦИПЛІНИ

Мета викладання дисципліни «Аналіз і моделювання процесів в електричних системах і об'єктах» полягає у формуванні у здобувачів освіти цілісного уявлення про методи дослідження та оптимізації складних енергетичних процесів. Вона спрямована на розвиток навичок системного мислення та використання сучасних інструментів моделювання. Основний акцент робиться на поєднанні теоретичних знань із практичними підходами до аналізу електричних систем. Дисципліна забезпечує підготовку до вирішення науково-технічних проблем у сфері енергетики. Її результатом є здатність студентів застосовувати моделювання для підвищення ефективності та надійності електроенергетичних об'єктів.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

- формування системного мислення та розуміння закономірностей функціонування електричних систем і об'єктів.
- засвоєння теоретичних основ аналізу та моделювання енергетичних процесів.
- ознайомлення з методами моделювання — математичним, фізичним, комп'ютерним та лабораторним.
- розвиток навичок оптимізації режимів роботи електричних систем та об'єктів.
- вивчення сучасних програмних засобів моделювання та їх практичного застосування у дослідженнях.
- формування умінь інтерпретації результатів моделювання та оцінки їх достовірності й практичної значимості.
- залучення знань і досвіду спеціалістів у системних дослідженнях та процесах прийняття рішень.
- підготовка до вирішення науково-технічних проблем у сфері енергетики та впровадження інноваційних технологій.

Вивчення даної дисципліни НЕМОЖЛИВО без визначеного науково-технічного інтересу здобувача освіти, адже практичний застосунок матеріалу дисципліни має гарантуватися саме на об'єкті наукового пошуку здобувача.

Результатом вивчення даної дисципліни повинно бути в загальному випадку здатність розв'язувати комплексні практичні задачі під час провадження

професійної діяльності в сфері електричних станцій, електричних мереж та електроенергетичних систем або у процесі навчання, що характеризується невизначеністю умов і вимог. Дана здатність забезпечується такими складовими як:
Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

Здатність приймати обґрунтовані рішення.

Здатність виявляти зворотні зв'язки та корегувати свої дії з їх врахуванням.

Здатність застосовувати отримані теоретичні знання, наукові і технічні методи для вирішення науково-технічних проблем і задач електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

Здатність здійснювати аналіз техніко-економічних показників та експертизу проєктно-конструкторських рішень в області електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

Здатність демонструвати знання і розуміння математичних принципів і методів, необхідних для використання в електроенергетиці, електротехніці та електромеханіці.

Здатність використовувати програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання, автоматизованого проєктування, автоматизованого виробництва і автоматизованої розробки або конструювання елементів електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних систем.

В результаті вивчення та набуття вказаних здатностей здобувач освіти повинен:

- відтворювати процеси в електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних системах при їх комп'ютерному моделюванні.

- опановувати нові версії або нове програмне забезпечення, призначене для комп'ютерного моделювання об'єктів та процесів у електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних системах.

- аналізувати процеси в електроенергетичному, електротехнічному та електромеханічному обладнанні і відповідних комплексах і системах.

- володіти методами математичного та фізичного моделювання об'єктів та процесів у електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних системах.

ТЕМА 2. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ АНАЛІЗУ

Поняття аналізу і синтезу систем

Системний аналіз - це науково-методологічна дисципліна, яка вивчає принципи, методи та засоби дослідження складних об'єктів за допомогою представлення їх як системи розглядається з урахуванням його системного характеру, тобто не як єдине ціле, а як комплекс взаємопов'язаних складових елементів, їх властивостей та процесів. Термін «системний аналіз» виник у роботах корпорації РЕНД, організованої наприкінці сорокових років у США на вирішення глобальних військових завдань та низки слабоструктурованих загальних проблем, і соціально-економічних процесів [1]. Основу системного аналізу становить загальна теорія систем, яка дозволяє здійснювати дослідження проблем, які не вирішуються аналітично. Як правило, подібні проблеми містять невизначеність ситуації, яка ускладнює прийняття рішень.

Системний підхід поєднує формальні знання та інтуїцію фахівців та стимулює цілеспрямоване аналітичне мислення. Він передбачає розбиття процесу дослідження на підпроцеси, моделює процеси цілеутворення і дозволяє виробити алгоритм прийняття рішення, спрямований на усунення проблем, що накопичилися. У процесі системного аналізу здійснюється не лише системне формулювання проблем, а й встановлення між ними причинно-наслідкових зв'язків та визначення найбільш значущих серед них для того, щоб потім сформулювати мету та визначити способи її досягнення. При цьому часто логічний аналіз супроводжується математичними, статистичними обчисленнями та вербальними оцінками як проблем, так і цілей та варіантів їх досягнення.

Аналіз [гр. analysis розкладання, розчленування] це: 1) метод наукового дослідження, що полягає у уявному чи фактичному розкладанні цілого на складові; 2) розбір, розгляд чогось. Суть аналізу (декомпозиції) – у поділі цілого на частини, у поданні складного у вигляді простих складових. Особливість системного аналізу полягає у використанні формальних та неформальних процедур визначення цілей та функцій систем управління. Цей

аналіз застосовується для вирішення проблем у ситуації невизначеності, коли слід використовувати експертні методи прийняття рішень. Під аналізом розуміється процес дослідження систем, заснований на їх декомпозиції з подальшим визначенням статичних та динамічних характеристик елементів, що розглядаються у взаємозв'язку з іншими елементами систем та навколишнім середовищем [2]

Цілі аналізу інформаційної системи: 1) детальне вивчення системи для більш ефективного використання та прийняття рішення щодо її подальшого вдосконалення або заміни; 2) дослідження альтернативних варіантів новоствореної інформаційної системи з метою вибору найкращого варіанта. До завдань аналізу системи належать: – визначення об'єкта аналізу; 10 – структурування системи: – визначення функціональних особливостей системи; – Вивчення інформаційних характеристик системи; – визначення кількісних та якісних показників системи; – оцінка ефективності системи; – узагальнення та оформлення результатів аналізу. Синтез є центральною ланкою створення інформаційної системи. Суть синтезу (агрегування) – у поєднанні (в думках чи реальному) простих складових об'єкта в єдине ціле. Особливості синтетичних методів полягають у тому, що вклад кожної частини загальносистемний ефект залежить від вкладів інших частин. Тому, наприклад, якщо кожну частину змусити функціонувати якнайкраще, то ефект не буде найвищим. Тобто акцент робиться не просто на розгляд окремих частин, а на їхню взаємодію. Складність системного аналізу у тому, що з розчленування цілого на частини необхідно не втратити властивості системи (властивості цілого).

Основні етапи і методи системного аналізу

Системний аналіз передбачає: розробку системного способу вирішення проблеми, тобто. логічно та процедурно організовану послідовність операцій, спрямованих на вибір кращої альтернативи рішення. СА реалізується

практично у кілька етапів, проте щодо їх числа та змісту поки що немає єдності, т.к. існує велика різноманітність прикладних проблем [2] Наведемо таблицю, яка ілюструє основні закономірності системного аналізу з різних наукових шкіл (табл. 1.1)

Таблиця 1.1

За Ф. Хансманом, 1978 рік	За Д. Джеферсом, 1981 рік	За В. В. Дружиніним, 1988 рік
1. Загальна орієнтація у проблемі (ескізна постановка проблеми) 2. Вибір відповідних критеріїв 3. Формування альтернативних рішень 4. Виділення суттєвих факторів зовнішнього середовища 5. Побудова моделі та її перевірка 6. Оцінка та прогноз параметрів моделі 7. Отримання інформації на основі моделі 8. Підготовка до вибору рішення 9. Реалізація та контроль	1. Вибір проблеми 2. Постановка задачі та обмеження ступеня її складності 3. Встановлення ієрархії, цілей та завдань 4. Вибір шляхів розв'язання задачі 5. Моделювання 6. Оцінка можливих стратегій 7. Використання результатів	1. Виділення проблеми 2. Опис 3. Встановлення критеріїв 4. Ідеалізація (граничне спрощення, спроба побудови моделі) 5. Декомпозиція (розбивка частинами, знаходження рішень частинами) 6. Композиція («склеювання» частин разом) 7. Прийняття найкращого рішення

ЛЕКЦІЯ 3. ВИДИ ТА ЕТАПИ АНАЛІЗУ

Історія розвитку системних уявлень.

Предмет системного аналізу Історія розвитку системних уявлень Системні уявлення та системність властиві процесу наукового пізнання, починаючи з різноманітних класифікацій людських знань і закінчуючи спробами наукового підходу до проблем керування державою. Історія розвитку методів системного аналізу стосується розвитку складових загальної теорії систем і пов'язана із розвитком двох понять: системності та керування, яке включає етапи прийняття рішень. Обидва поняття усвідомлено чи не усвідомлено застосовували ще з давніх-давен. Проте ще й досі немає однозначного загальноприйнятого стандарту тлумачення основних понять системного аналізу та теорії систем. Основні чинники цього факту лежать у динамічності процесів людської діяльності та у принциповій можливості застосування системного підходу практично до будь-якої задачі, що розв'язує людина у різних предметних сферах своєї діяльності. З точки зору сучасних уявлень системність була і є одним із методів науки. Великі вчені – А. Ампер, Б. Трентовський, Л. фон Берталанфі, Н. Вінер стали фундаторами змісту, понять та закономірностей системного аналізу. Питання про науковий підхід до керування складними системами вперше було порушено А. Ампером. Саме в його роботі «Дослідження філософії або аналітичний виклад» було здійснено класифікацію всіх людських знань, зокрема було виділено науку про керування державою, названу кібернетикою.

Сенс терміну *χοῦερνῶ* (гібернет), як особи, що керує ресурсами та людьми, які населяють певною територію, був зрозумілий ще задовго від робіт Н. Вінера. Польський вчений Б.Трентовський видав книгу «Ставлення філософії до кібернетики як до мистецтва керування народом» (1843 р.). На думку вченого, дійсно ефективне керування повинно враховувати всі зовнішні та внутрішні фактори, що впливають на об'єкт керування, а головна складність його реалізації пов'язана із складністю поведінки людей. Наступний етап у

вивченні системності пов'язаний із вченим А.Богдановим, який протягом 1911–1925 рр. видав три томи книги «Всеобщая организационная наука (тектология)». За А.Богдановим загальність тектології пов'язана з тим, що всі існуючі об'єкти та предмети мають певний рівень організованості і тому, на відміну від конкретних наук, тектологія повинна вивчати загальні закономірності організації для всіх рівнів організованості.

Значний вплив на усвідомлення деяких аспектів системності мають роботи Н. Вінера. Його книга «Кібернетика» вийшла друком у 1948 р. Однак виникнення загальної теорії системності пов'язують з ім'ям австрійського фізіолога Л. фон Берталанфі, який у 20-30-х рр. ХХ сторіччя вже включав до загальної теорії системності багато наук – кібернетику, теорію інформації, теорію рішень, топологію, факторний аналіз, теорію множин, теорію 9 мереж, теорію автоматів, теорію масового обслуговування тощо.

Найважливішим досягненням цього вченого є визначення поняття відкритої системи. Л. фон Берталанфі виділяє три основні напрями загальної теорії систем:

1. наука про систему;
2. системна технологія;
3. системна філософія.

Наука про системи досліджує застосування системних концепцій у суспільних фізичних (або фізіологічних) науках та науках про поведінку емпіричним чином. Увага зосереджується на науковому вивченні цілого та цілісності на противагу до по-елементного. Системна технологія розглядає проблеми, що виникають у промисловості та суспільстві, які можна досліджувати шляхом застосування теорії систем.

Системна філософія покликана концептуалізувати взаємні зв'язки та взаємні залежності між теоріями, що сформовані в різних сферах наукових досліджень, вона є спробою об'єднати розділи традиційної науки в межах філософських концепцій загальних систем. К.Л. фон Берталанфі дав визначення відкритої системи. Системотехніка як науковий напрям виникла у

США на початку 50-х рр. XX ст. Системотехніка описує своєрідні «правила поведінки» інженера, що контролює складні системи, тобто термінологію Берталанфі, відповідає поняттю системної технології. Основні завдання системотехніки:

1. Виявлення та опис найзагальніших системних характеристик та закономірностей, що не залежать від конкретного типу технічних комплексів.
2. Розроблення експериментальних методів, що дають змогу з достатнім рівнем достовірності та за умов прийняття об'єму ресурсів оцінити теоретичні концепції.
3. Розроблення методів реалізації принципів системотехніки під час створенні окремих систем.

Від минулого сторіччя і по теперішній час значний внесок в поглиблення положень системного аналізу, теорії прийняття рішень та розвитку кібернетики зробили видатні вчені Н.Бор, Л.Заде, В.М.Глушков, Г.Альтшуллер, М.З.Згуровський та ін. Загальна теорія систем – наукова дисципліна, що вивчає найфундаментальніші поняття і аспекти систем. Вона вивчає різні явища, відволікаючись від їх конкретної природи і ґрунтуючись лише на формальних взаємозв'язках між різними складовими, на характер їх зміни під впливом зовнішніх умов. При цьому результати всіх спостережень пояснюються лише взаємодії їх компонентів. Наприклад характером їх організації і функціонування, а не безпосереднім зверненням до природи залучених в явища механізмів (будь вони фізичними, біологічними, екологічними, соціологічними, або концептуальними). Для загальної теорії систем об'єктом дослідження є не фізична реальність, а система, тобто абстрактний формальний взаємозв'язок між основними ознаками і властивостями.

При системному підході об'єкт дослідження представляють лише як систему. Само поняття система можна віднести до одного з методологічних понять. Під системою розуміють сукупність (множину) окремих об'єктів із зв'язками між ними. Навіть тоді, коли ми маємо лише два об'єкти, то це вже

система. Тому системою можна вважати пари: викладач – студент; продавець – покупець; телевізор – передаюча станція; верстат – обробляючий комплекс тощо. Таким чином, можна вважати системи засобом існування навколишнього світу. Цінність системного підходу полягає в тому, що розгляд категорій системного аналізу створює основу для логічного і послідовного підходу до проблеми прийняття рішень. Ефективність вирішення проблем за допомогою системного аналізу визначається структурою розв'язуваних проблем. Предмет системного аналізу Системний аналіз – прикладна наука, яка виявляє складні причини, що виникають перед «власником проблеми» та формує варіанти їх усунення, являє собою послідовність дій з установлення структурних зв'язків між змінними або елементами досліджуваної системи.

Системний погляд на цей світ має як мінімум два завдання: – розширити та поглибити уявлення про механізм взаємодій об'єктів у системі; – підвищити ефективність функціонування системи (головне). Об'єкти системи – досить широкого діапазону: від простих живих організмів у біології до механізмів, комп'ютерів та каналів зв'язку у техніці. Та, незважаючи на цей факт, задачі та принципи системного підходу й досі незмінні та не залежать від природи об'єктів у системі. Для фахівців напряму «Машинобудування» найбільший інтерес становлять технічні та технологічні системи, а глобальним завданням системного підходу – вдосконалення процесу управління ними та економіки загалом. Предметом системного аналізу буде питання збору, зберігання та обробки інформації про фізичні об'єкти та технологічні процеси. Якщо згадати класичне визначення кібернетики, як науки про загальні закони отримання, зберігання, передачі та перетворення інформації (кібернетика дослівно – «мистецтво управляти»), можна вважати теорію систем та системний аналіз фундаментальним розділом технічної кібернетики.

Значне місце в організації аналітичної роботи належить визначенню змісту і послідовності окремих її етапів. Перелік етапів економічного аналізу в підручниках різних авторів і навчальних посібниках коливається в межах від трьох до восьми. Наявність у суб'єктів господарювання різноманітних як

технічних, так і економічних засобів досягнення цілі - випуску продукції (товарів) - впливає, у свою чергу, на особливості планування аналітичної роботи, кількість та послідовність етапів.

Визначення методу економічного аналізу дає змогу сформулювати ті головні елементи, які характеризують етапи аналітичної роботи: - вивчення і попередня оцінка досягнутого підприємством рівня (проти запланованого); - вимірювання взаємозв'язку показників і факторів та визначення на цій основі причин розбіжностей планових і фактичних показників; - підсумкова оцінка, підрахунок резервів підвищення ефективності господарювання. Ці головні елементи майже повністю збігаються з найбільш практично поширеною організацією аналітичної роботи за трьома етапами: підготовчим, основним і завершальним. Підготовчий етап:

1. Розробка плану та програми аналітичної роботи. План аналітичної роботи складається на рік з розбивкою по кварталам: передбачаються зміст, періодичність і методи проведення аналізу, вказуються розділи господарської діяльності та об'єкти, які включені в план періодичного контролю, терміни проведення, відповідальні виконавці, технічні засоби й джерела інформації, які необхідні для аналізу, а також строки і порядок обробки результатів.

2. Вибір і визначення загального стану об'єкта аналізу.

3. Формування цілей та завдань аналізу і напрямків використання його результатів.

4. Розробка системи синтетичних та аналітичних показників, за допомогою яких характеризується об'єкт аналізу.

5. Розподіл роботи між аналітиками.

6. Розробка макетів і форм аналітичних таблиць, графіків, схем.

7. Перевірка достовірності джерел інформації та вивчення матеріалів попередніх обстежень.

8. Визначення конкретних виконавців та розподіл обов'язків між ними, а також інші організаційні питання.

Основний етап

1. Збирання та опрацювання необхідної інформації,
2. Перевірка повноти й вірогідності звітних даних, проведення арифметичного, логічного і балансового зведення показників.
3. Визначення загальних відхилень величини показників виконання завдань від базових величин.
4. Виявлення взаємодіючих факторів і обчислення їхнього впливу на зміну величини показників.
5. Виявлення зайвих витрат і невикористаних можливостей (перспективних резервів) підвищення ефективності виробництва.

Завершальний етап:

1. Проведення підсумкової оцінки діяльності і узагальнення результатів аналізу.
2. Розробка висновків і пропозицій щодо прийняття належних управлінських рішень за результатами аналізу, відповідно до його цілей і завдань. Ці висновки та пропозиції оформляються у вигляді пояснювальної записки до звіту чи доповідної записки на ім'я керівника підприємства або особи, за доручення якої проводився аналіз.
3. Розробка організаційно-технічних заходів щодо усунення недоліків, підвищення ефективності використання виявлених резервів (за виконанням заходів слід встановити дійовий повсякденний контроль).
4. Підготовка розпорядчих актів, призначення осіб, відповідальних за виконання прийнятих рішень.
5. Контроль за впровадженням у виробництво пропозицій, що їх було висунуто за результатами аналізу. У процесі аналітичної роботи окремі складові названих етапів можуть повторюватися. Така ситуація стає можливою, наприклад, тоді, коли на якомусь із етапів дослідження виникає необхідність розширити факторне поле аналізу, що потребує нової допоміжної роботи. Зрозуміло, що межі етапів мають певною мірою умовний характер і є дуже рухливими: за рахунок інтенсифікації робіт на одному з етапів відбувається скорочення на якомусь іншому і т. п. Отже, головним завданням

такої поетапної регламентації економічного аналізу є забезпечення дійового поточного контролю за дотриманням якості аналітичної роботи і термінів її виконання.

ЛЕКЦІЯ 4. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Принципи системного аналізу

Теорія систем та системний аналіз, як галузь науки, можна поділити на дві умовні частини:

– Теоретичну, що базується на таких галузях як теорія ймовірності, теорія ігор, теорія графів, теорія розкладів, теорій рішень, факторний аналіз тощо; 11 – Прикладну, що ґрунтується на прикладній математичній статистиці, методах досліджень операцій, системотехніці та ін. Таким чином, теорія систем та системний аналіз широко застосовує дослідження багатьох галузей науки та постійно поширюється на інші галузі. Водночас у теорії систем існує своє ядро, свій особливий метод – системний підхід до задач, що виникають. Сутність цього підходу досить проста: всі елементи системи та всі операції в ній мають розглядатися лише як єдине ціле, лише у сукупності, лише у взаємодії один з одним. Локальний підхід, рішення, врахування недостатньої кількості факторів, локальна оптимізація – на рівні окремих елементів, майже завжди призводить до неефективного загалом, а інколи й небезпечного за наслідками результату. Принципи системного аналізу та теорії систем:

1. Принцип єдності: сумісний розгляд системи і як цілого і як сукупності компонентів. Вимога розглядати сукупність елементів як одне ціле, або більш жорстко: заборона розгляду системи як простого об'єднання її елементів.
2. Визнання того факту, що властивості системи не просто сума властивостей її елементів. Таким чином, є можливість того, що система може мати особливі властивості, яких немає і не може бути в її окремих елементів.
3. Принцип знаходження максимуму ефективності системи від умов її побудови, функціонування.
4. Принцип зв'язаності: довільна компонентна система розглядається разом з її зв'язками з оточенням. Це врахування зовнішніх зв'язків, або більш загально, вимога розглядати систему як частину (підсистему) деякої більш загальної системи.
5. Принцип модульності – можливості, а інколи і необхідності поділу певної системи на частини,

підсистеми. Аналіз систем – це частина дисципліни «технічна кібернетика», яка розглядає питання стану, умов існування, експлуатаційних параметрів систем та методи їх поліпшення. Технічна кібернетика, її предмет та методи

Технічна кібернетика – це система знань, умінь та навичок, що дають змогу здійснювати аналіз системи, розглядати її відповідність певним нормативам та вимогам, визначати проблемні зв'язки, формулювати методи їх вирішення та приймати єдине вірне оптимальне рішення. Предметом технічної кібернетики є складні динамічні природні та штучні системи, які поділяються на три основні системи:

- Технічні засоби виробництва;
- Технологічні методи виробництва;
- Виробничі процеси виробництва.

Методи технічної кібернетики наступні:

1. Аналіз систем:

- 1.1. Інженерний аналіз;
- 1.2. Структурний аналіз;
- 1.3. Параметричний аналіз;
- 1.4. Функціональний аналіз;
- 1.5. Якісний аналіз.

2. Пошук рішення:

- 2.1. Конструктивне рішення;
- 2.2. Зміна умов експлуатації;
- 2.3. Параметричний синтез;
- 2.4. Математичне моделювання та прогнозування стану системи.

3. Оптимізація системи:

- 3.1. Багатокритеріальний вибір;
- 3.2. Функціонально-вартісний аналіз;
- 3.3. Лінійне програмування;
- 3.4. Багатомірна оптимізація.

4. Цільове дослідження результату впровадження:

4.1. Автоматизовані системи управління (АСУ);

4.2. Автоматизовані системи аналізу стану (АСАС).

Вимоги до сучасної інженерної діяльності В основі інженерної діяльності лежать форми та методи інженерного проєктування, виготовлення продукту, впровадження продукту в експлуатацію, експлуатація продукту, керування та регулювання параметрів експлуатації, обслуговування та ремонт продукту, матеріально-технічне забезпечення системи виробництва тощо. Сучасний стан інженерної діяльності характеризується такими негативними тенденціями:

1. Поглинання інженерії нетрадиційним проєктуванням – (проєктування здійснюється не для задоволення потреб людини, а для задоволення потреб наступного інженерного проєкту). Недоліки такого проєктування: неконтрольований вплив продуктів інженерії на навколишнє середовище, природні процеси, людину і суспільство.

2. Поглинання інженерії технологією.

3. Усвідомлення негативних наслідків інженерної діяльності. Останнім часом постало питання систематизування та впорядкування інженерної діяльності загалом.

Було сформовано основні вимоги до сучасної інженерної діяльності: • Забезпечення системної єдності техніки, технології та природного середовища.

- Зниження негативних наслідків машинних технологій.
- Упровадження ресурсно-економічних, безпечних механізованих процесів.

- Володіння методами винахідництва;
- Володіння методами системного аналізу;
- Володіння технічними знаннями;
- Широка спеціалізація;
- Математична майстерність;

- Знання технології виробництва;
- Вміння приймати інженерно обґрунтовані рішення;
- Вміння передати інформацію і технічно грамотно її сформулювати.

Системи та їх класифікація **Поняття системи, середовища**

У визначенні поняття системи виділяють дві групи: Першу групу – становлять визначення, що не відокремлюють поняття цілісної системи, наприклад: Система – це множина об’єктів разом з відношенням між об’єктами та між їхніми атрибутами (тобто, властивостями). Історія визначень такого типу походить від природознавчих наук, де дослідження йшли від простого до складного: спочатку поділяли системи на елементи, потім розглядали властивості окремих частин і способи їх взаємодії. Таким чином склалося уявлення про систему як про сукупність взаємопов’язаних елементів. Друга група – включає цілісність, як важливу властивість системи. У цьому розумінні, система – це комплекс взаємопов’язаних елементів, що утворюють цілісність. За основне визначення приймемо наступне: Система (від грец. *συστημα* – складений) – множина взаємопов’язаних об’єктів (елементів), що організовані деяким способом в єдине ціле та протистоять середовищу. Термін використовують як для визначення конкретної системи – наприклад, агротехнічний комплекс країни, так й для абстрактної теоретичної моделі – ринкова економічна система країни. Елементи системи – це ті складові, що не підлягають подальшому членуванню, а їхня внутрішня структура є несуттєвою для розв’язку конкретної задачі. У будь-якій системі встановлюються взаємозв’язки між елементами. Зв’язки характеризуються речовинними (матеріальними), енергетичними або інформаційними обмінами. Зв’язки можуть бути між елементами системи – внутрішні зв’язки, або між системою і середовищем – зовнішні зв’язки. Зазначені властивості відрізняють систему від простого конгломерату (об’єднання) і виділяють систему з навколишнього середовища у вигляді цілісного утворення. Система утворює

особливу єдність середовищ та є елементом надсистеми. Середовище – сукупність всіх об’єктів, зміна яких впливає на систему, а також об’єкти, що змінюються під дією системи. Це те, що оточує систему, та впливає на її функціонування. Середовищем, що оточує, для системи може бути інша більш загальна система, яку в такому випадку називають надсистемою. В такому разі, існують ранги систем: • підсистема – система, що є частиною іншої системи. • надсистема – більш велика система, частиною якої є система, яку розглядають. Властивості систем та методи їх оптимального управління вивчає системний аналіз, за яким визначаються можливості поліпшення їх функціонування. Великі складні об’єкти (системи), досліджують як єдине ціле разом із узгодженим функціонуванням усіх елементів і частин. Вивчають кожний елемент системи у його зв’язку та взаємодії з іншими елементами, виявляють вплив властивостей окремих частин системи на її поведінку, загалом, визначають оптимальний режим функціонування системи. За системного підходу в дослідженнях використовуються моделі. Модель – це система, що замінює об’єкт пізнання та слугує джерелом інформації стосовно нього. Модель – це такий аналог, подібність якого до оригіналу суттєва, а розбіжність несуттєва. Модель поділяють на два види: матеріальні та ідеальні. Матеріальні втілюються в певному матеріалі – бетоні, металі, пластмасі тощо. Ідеальні моделі фіксуються в таких наочних елементах, як креслення, рисунок, схема, комп’ютерна програма і т. ін. Під час моделювання використовують комп’ютерні інформаційні технології. Технологія – (від грец. *Techne* – мистецтво, уміння + *логія* – (грец. *logos* – слово, поняття, вчення), у зазначеному випадку відповідає значенню слова «наука»). Це сукупність методів обробки, виготовлення, зміни стану, властивостей або форми сировини, матеріалу або напівфабрикату у процесі виробництва; або наука про засоби дії на сировину, матеріали та напівфабрикати відповідними засобами виробництва. Узагальнена модель системи Узагальнену модель системи показано на рис. 4.1. Загалом структуру складають елементи та зв’язки між ними. Якщо позначити множину елементів як $E=\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, а

множину зв'язків як $R=\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, то структура технічної системи Structure буде складена з цих множин, тобто з E і R: $Structure = \{E, R\}$. Поняття елементу системи та системи – це досить відносні. Наприклад, під час розгляду задачі обґрунтування складу машино-тракторного підприємства, сільськогосподарська машина – елемент системи, а під час діагностування та вдосконалення конструкції її елементів, сільськогосподарська машина – це вже система, а окремі деталі та вузли – елементи цієї системи.

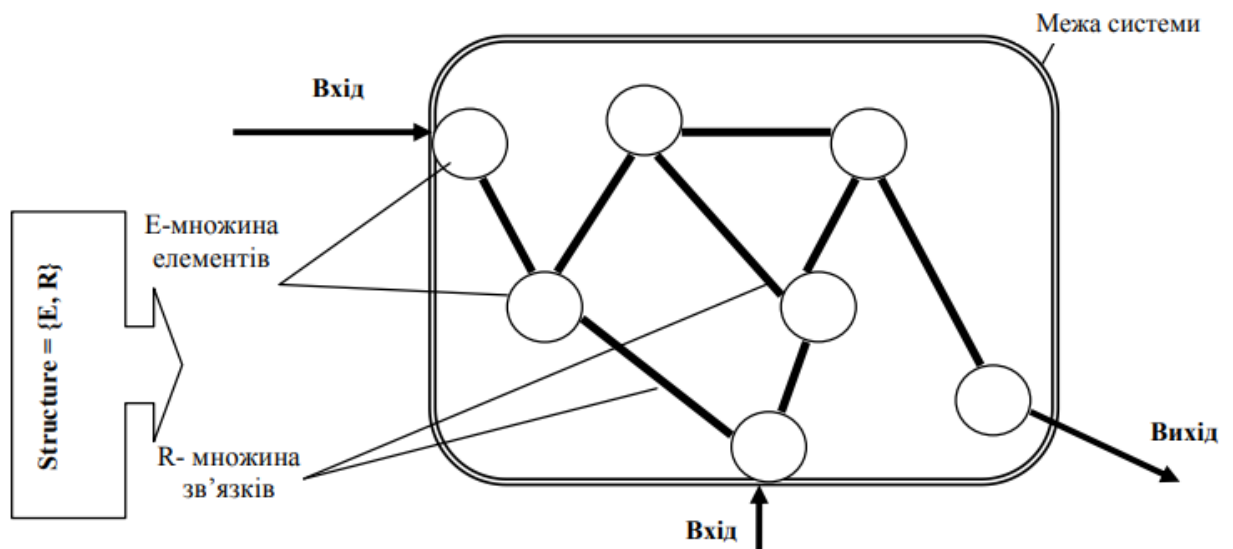


Рисунок. 4.1 – Узагальнена модель системи

Структура системи характеризує внутрішню організацію, порядок і побудову системи, вона складається з множини елементів та зв'язків.

Вхід – це відношення навколишнього середовища до системи (навколишнє середовище $\rightarrow$ система).

Вихід – це відношення системи до навколишнього середовища (система $\rightarrow$ навколишнє середовище).

Загальна класифікація систем

Поняття класифікації є важливим у будь-якій науці. Системи класифікують за різними класифікаційними ознаками. Класифікацію систем розглядатимемо за такими ознаками, як: • За призначенням (метою); • За

походженням; E-множина елементів R- множина зв'язків Вихід Вхід Вхід
Structure = {E, R} Межа системи

- За взаємодією із зовнішнім середовищем;
- За місцем системи в ієрархії – за рангом;
- За зміною стану;
- За характером функціонування;
- За видами складових елементів;
- За числом елементів, характером та типом зв'язків;
- За способом керування.

За призначенням системи поділяються на:

- пасивні;
- активні.

Пасивні – пристрої для виконання заданих вимог, цілі в них задані наперед та не можуть змінюватися довільно, внутрішньо ціль їм не властива.

Активні – такі, які спроможні формулювати і реалізовувати дії з множин альтернатив для задоволення власних потреб.

Цілі та способи їх виробу змінюються із часом. Динамізм їх полягає у тому, що вони постійно зазнають змін у часі та просторі під дією зовнішніх факторів, не лише пристосовуються до змін, але й самі змінюються. Їх головна розбіжність – наявність інформаційних взаємодій. Класифікацію систем за походженням зображено на рис.4.2. За походженням, природною належністю системи класифікуються, як:

- системи, що створені людиною (формальні і неформальні);
- системи, що створені природою (живі й неживі). Формальні системи – мови, математичні системи. Неформальні – включають до свого складу як фізичні так і формальні елементи, вони поділяються на: – технічні системи; – системи за участю людини (людино-машинні та соціально-економічні). Технічні системи – це системи, які створені людиною з елементів технічної сутності на множині зв'язків, та мають чітко визначену ціль. Під

технологічною системою розуміють сукупність функціонально взаємозалежних засобів технологічного оснащення, предметів виробництва й виконавців для виконання в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів і операцій, в них відбувається перетворення продукту з початкового до кінцевого стану. Людино-машинні системи – це системи, до складу яких ще входить людина, але мета визначена творцем такої системи. Людина в такій системі підпорядкована меті технічної складової і виконує операції, яких потребує обслуговування машини, наприклад, льотчик у літаку, космонавт у кораблі, водій в авто. У соціально-економічних системах, окрім суто технічних складових, має місце людський фактор, який визначається цілями людей, які входять до складу цієї системи. Крім того в таких системах людина ставить цілі не лише перед технічними системами, але й перед людьми, що входять до таких систем як елементи.

За зв'язками із оточенням:

- відкриті (з певним середовищем, тобто із входом та виходом), обмінюються енергією, речовиною та інформацією із довкіллям;
- замкнені. Бувають закриті (обмінюються лише енергією, але не речовиною) та ізольовані (будь-який обмін виключний). Для останніх характерне збільшення безладу – другий закон термодинаміки).

За місцем системи в ієрархії (за рангом):

надсистема,

система,

підсистема

За зміною стану:

- динамічні (стан змінюється у часі);
- статичні (стан не змінюється у часі).

За характером функціонування:

- детерміновані (відповідно до стану системи можна однозначно судити про функціонування системи);

- стохастичні (від грец. здогад), в яких діють випадкові або імовірнісні процеси, характер змін у часі не можна точно передбачити, можливі лише припущення відносно можливих варіантів функціонування.

За видом елементів:

фізичні (елементи – реальні предмети) та абстрактні (елементи – символи (знаки, букви, цифри)).

Фізичні системи бувають як:

- система типу «об'єкт» – технічна система (елементом є речі, наприклад, редуктор, двигун);
- система типу «процес» – технологічна система (елементами є операції, наприклад, різання, виготовлення, фільтрація).

За числом елементів, характером та типом зв'язків системи бувають:

- прості;
- складні.

Поняття «складність» не має чіткого формального визначення.

Для інженера, складна система – це система з великою кількістю взаємопов'язаних елементів, поведінка якої може бути точно прогнозована, тобто передбачена. Для отримання інформації про велику систему дослідник послідовно розглядає її по частинах, будуючи підсистеми. Якщо дослідник просувається від елементів підсистем різних рівнів до системи загалом, то це є шлях композиції. Шлях протилежного напрямку називають декомпозицією. Складні системи – це цілеспрямовані системи, побудовані для розв'язання задач із численними умовами, що відображають різноманітні, не порівнянні між собою характеристики об'єктів системи, взаємопов'язаний комплекс різних людей. Цілеспрямоване втручання в перебіг процесів у системі називають керуванням.

За способом керування системи поділяються на:

- керовані ззовні;
- самокеровані;

• з комбінованим керуванням (управління ззовні і зсередини). У керованих ззовні основний вплив здійснюється із зовнішнього боку стосовно неї. У системі з комбінованим керуванням, керування здійснюється частково і ззовні, і зсередини. Незалежно від того, де знаходиться управляючий блок, існують такі основні типи керування:

1. Керування згідно з динамічною програмою;
2. Регулювання;
3. Процес параметричної адаптації системи;
4. Процес структурної адаптації.

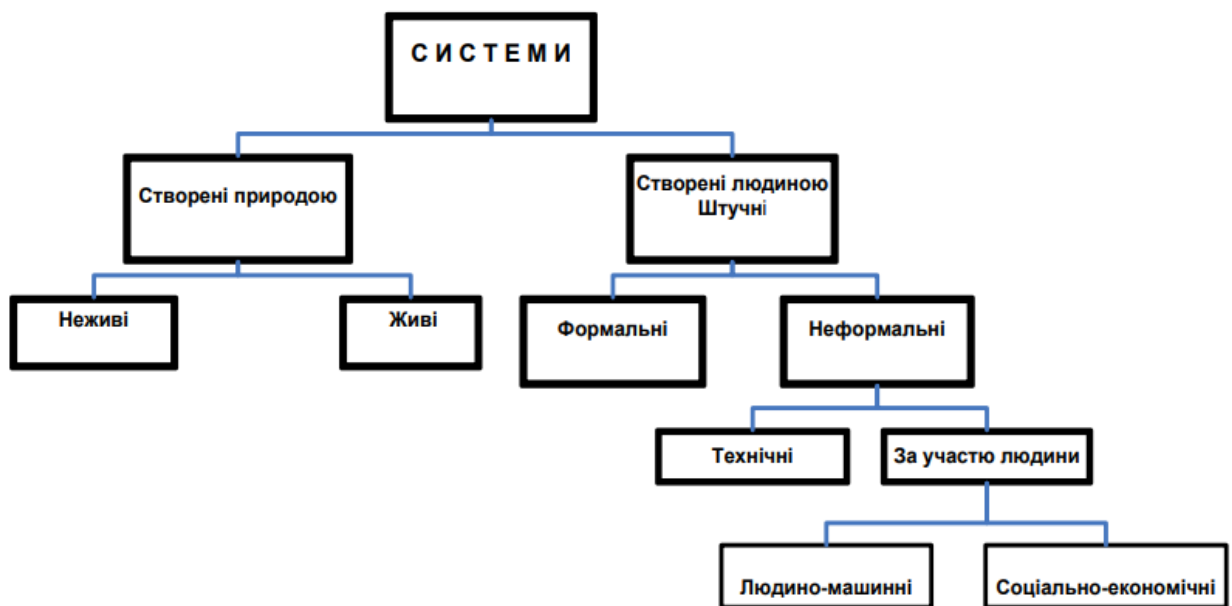


Рисунок 4.2 – Класифікація систем

Технічну систему при вивченні доцільно розглядати як «чорну скриньку», не звертаючи увагу на її вміст, а лише враховувати її зовнішні прояви: вхідні сигнали, зазвичай позначені літерою X, та вихідні сигнали, так звані відгуки технічної системи, що позначають літерою Y. Вихідними параметрами технологічної системи будуть слугувати параметри обробленої деталі: точність, шорсткість, продуктивність, стійкість обробки й т. ін. У зв'язку з необхідністю проєктування систем розглядають характерні типи

задач: аналізу, синтезу, вимірювання, задача «чорної скриньки», які зведено в таблицю 4.1.

Задача аналізу – задано структуру (відомі вхід X і об'єкт Z), необхідно визначити функціонування системи – вихідні параметри Y .

Задача синтезу – задані характер функціонування (вихідні параметри Y) та інші вимоги до системи, включаючи вектор вхідних параметрів X . Необхідно визначити структуру Z , яка б задовольняла поставленим вимогам.

Задача вимірювання – задані параметри системи (Z) і характер функціонування (вихідні параметри Y), необхідно визначити вхідні параметри X .

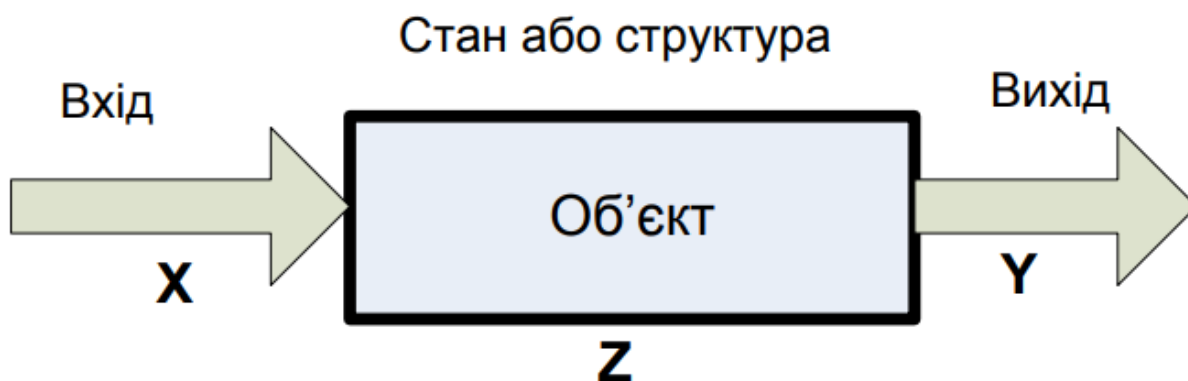


Рисунок 1.3 – Модель системи

Таблиця 1.1 – Характерні типи задач при проектуванні систем

Вектор змінних	Вхід	Об'єкт	Вихід
Параметр			
Тип задачі	X	Z	Y
Аналіз	+	+	?
Синтез	+	?	+
Вимірювання	?	+	+
“Чорна скринька”	+	?	?

Властивості систем

Властивість – істотна ознака системи, що проявляється на множині елементів як всередині системи, так і ззовні, характеризується показниками роботи системи.

Показник – це кількісний вираз властивостей системи.

Властивості, пов'язані із метою та функціями: синергізм (синергізм, синергія, від грец. – співдружність, варіант реакції на комбіновану дію двох або більше компонент, коли загальна дія перебільшує) – ефективність сумісного функціонування елементів системи вища, ніж сумарна ефективність ізольованого функціонування цих же елементів. • пріоритет інтересів системи більш глобального рівня перед інтересами її компонентів; • емерджентність (від англ. emergency – виникнення з нічого, раптова поява, неочікувана випадковість) – неочікувана поява нових властивостей та якостей у системі. Або цілі (функції) компонентів системи не завжди збігаються із цілями (функціями) системи; Виявлення емерджентності в процесі агрегації – класичний приклад об'єднання автоматів, наведений М. Арбібом (рис.4.4 та рис.4.5). На рис.4.4 наведено елементарний автомат. Якщо на його вхід подано число імпульсів n , то на виході отримуємо на одиницю більше ніж на вході – $n+1$. Параметр Тип задачі 20 Якщо об'єднати в кільце два таких автомати, що генерують на виході число, більше на одиницю від числа на вході, то на виходах А і В будуть генеруватиметься послідовність чисел: на одному – парних, а на іншому – непарних (рис.4.5). Поява цих нових якостей є виявом внутрішньої цілісності системи, її системотворчим фактором.

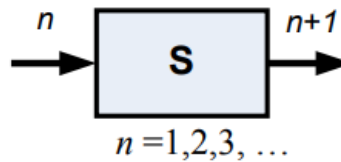


Рисунок 1.4 – Елементарний автомат

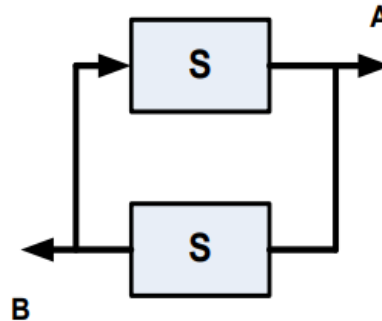


Рисунок 1.5 – Агрегація автоматів – система з новими властивостями

- мультиплікативність (множинність) – позитивним та негативним ефектам функціонування компонентів у системі притаманні властивість множення, а не додавання;
- альтернативність шляхів функціонування та розвитку. Властивості, пов'язані із структурою:
 - цілісність – первинність цілого перед частками системи;
 - не адитивність – принципова невідповідність властивостей системи сумі властивостей її складових;
 - структурність – можлива декомпозиція системи на компоненти та встановлення зв'язків між ними;
 - ієрархічність – кожен компонент системи може розглядатися як система (підсистема) більш широкої глобальної системи. Властивості, пов'язані із ресурсами та особливостями взаємодії із середовищем:
 - комунікативність – існування складної системи комунікацій із середовищем як ієрархії;
 - взаємодія та взаємозалежність системи та зовнішнього середовища;
 - адаптивність – пристосування параметрів системи до змін зовнішнього середовища; $S_n \rightarrow S_{n+1}$

- надійність – функціонування системи у випадку, коли має місце псування однієї з компонент системи, зберігання проектних параметрів системи упродовж запланованого періоду.

ЛЕКЦІЯ 5. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ПРОБЛЕМИ

У широкому розумінні **інформація** – це знання, відомості, дані, які отримуються та нагромаджуються в процесі розвитку науки та в практичній діяльності людей; у вузькому розумінні – це дані, які є об'єктом обробки, передачі та зберігання.

Наукова інформація – це сукупність будь-яких відомостей про стан і зміни параметрів об'єктів дослідження або відповідності їх нормативно-правовим актам; одне із загальних понять науки – це нові відомості про навколишній світ.

Залежно від ознак, які відображають властивості об'єктів, виділяють такі види інформації: **природничо-наукова; техніко-технологічна; економічна; соціально-політична.**

Економічна інформація – це сукупність цифр, фактів, відомостей та інших даних, яка відображає суспільно-економічні явища та процеси.

Класифікація економічної інформації

За призначенням економічна інформація може бути: плановою, оперативною, бухгалтерською, статистичною, проектно-конструкторською, нормативною та управлінською.

Залежно від функцій економічну інформацію поділяють на таку, що використовується в інформаційному забезпеченні господарської діяльності та для наукових досліджень.

Залежно від ступеня інформаційної деталізації розрізняють синтетичну (узагальнену) та аналітичну (яку одержують шляхом аналітичних розрахунків на основі синтетичної інформації) економічну інформацію.

Відносно об'єкта дослідження економічну інформацію поділяють на внутрішню й зовнішню, вхідну та вихідну, оперативну та поточну.

За стабільністю використання або зберігання економічну

інформацію поділяють на умовно-постійну (постійну), яка використовується без суттєвих змін протягом кількох звітних періодів (квартал, рік), і змінну.

Економічну інформацію класифікують і за іншими ознаками: способом відображення, насиченістю даних, корисністю використання, способом подання, ознаками обробки тощо.

Основна роль інформації у дослідженнях полягає в тому, щоб виключити суб'єктивні судження про досліджуваний об'єкт.

При проведенні НДР інформація виконує такі ***функції***:

- сприяє визначенню сучасних тенденцій у вирішенні даної наукової проблеми;
- дає змогу визначити актуальність, рівень розробленості даної наукової проблеми;
- надає матеріал для вибору аспектів і напрямів дослідження, його мети і завдань, а також теоретичних побудов;
- забезпечує достовірність висновків і результатів пошуків, зв'язок сформованої концепції із загальним розвитком теорії.

Види джерел інформації

Організація та здійснення досліджень значною мірою залежать від складу, змісту та характеру джерел, які для цього використовуються. Застосування комп'ютерних технологій у наукових дослідженнях не замінює документальні джерела інформації, а, навпаки, посилює потребу в них.

Науковим документом, або документом науково-технічної інформації, називається носій, в якому в той чи інший спосіб зафіксовані наукові відомості (дані) або науково-технічна інформація, в яких

повинно бути відмічено, ким, де і коли він був створений.

Документи науково-технічної інформації представлені такими основними групами: *друковані, машинописні (рукописні)*.

Друковані джерела інформації включають: *навчальні матеріали; наукові матеріали; нормативні матеріали; статистичні матеріали; інші матеріали.*

Навчальні матеріали – це видання літератури з навчальних дисциплін (підручники, навчальні посібники, програмно-методичні матеріали), призначені для підготовки спеціалістів в окремих галузях.

Підручник – це навчальне видання, яке містить систематизоване викладення навчальної дисципліни (її розділу, частини), відповідає навчальній програмі й офіційно затверджене Міністерством освіти і науки України як даний вид видання.

Навчальні посібники – це друковані, графічні, наочні та інші матеріали (книги, таблиці, карти, картини, макети, моделі, діапозитиви, кінофільми тощо), які використовуються у процесі навчання з метою забезпечення кращого засвоєння учнями знань, вмінь і навиків.

Практичні посібники – це видання, розраховані на задоволення потреб окремих категорій спеціалістів народного господарства в їх повсякденній практичній діяльності.

Наукові матеріали видаються у вигляді монографій, узагальнюючих наукових праць, збірників статей, рефератів, тез, в яких висвітлюються різні наукові проблеми.

Монографія – це наукова праця у вигляді книги, яка містить повне або поглиблене дослідження однієї проблеми чи теми, яка належить одному або декільком авторам.

Наукова монографія – це наукове дослідження, в якому різнобічно й вичерпно висвітлюється вибрана наукова проблема з критичним її

аналізом, визначенням вагомості, формулюванням нових наукових концепцій. Монографія фіксує науковий пріоритет, забезпечує суспільство первинною науковою інформацією, призначена для висвітлення наукового змісту та результатів дисертаційного дослідження.

Стаття – відомості обсягом, як правило, в декілька машинописних сторінок, опубліковані в науковому чи науково-популярному журналі, збірнику наукових праць чи газеті.

Реферат – короткий виклад (усний або письмовий) наукової праці, вчення, змісту книги, результатів наукового дослідження.

Тези – короткий виклад основних положень лекції, доповіді, твору.

Тези доповідей наукової конференції – науковий неперіодичний збірник, який містить опубліковані до початку конференції матеріали попереднього характеру (анотації, реферати доповідей і (або) повідомлень).

Наукові матеріали мають велику цінність з огляду на те, що науковець може ознайомитися з нетрадиційним трактуванням тих чи інших питань, критикою поглядів інших авторів, а також науковою новизною, характерною для науки на конкретному етапі її розвитку.

Нормативні матеріали видаються органами законодавчої та виконавчої влади різних рівнів у вигляді законів, наказів, інструкцій, положень (стандартів) тощо і містять основні норми й правила та є основою для здійснення будь-якої діяльності.

Закон – виданий у встановленому порядку загальнообов’язковий акт найвищого органу державної влади, який має вищу юридичну силу.

Наказ – акт управління, що видається керівниками міністерств, відомств, відділів і управлінь виконкомів місцевих рад народних депутатів, а також керівниками підприємств, установ та організацій.

Положення (стандарт) – нормативно-правовий акт, затверджений відповідним міністерством, який регламентує окремі види діяльності.

Інструкція – 1) нормативний акт, що видається міністерствами, керівниками інших центральних і місцевих органів державного управління в межах їх компетенції на основі та задля виконання законів, указів, постанов і розпоряджень уряду й актів вищих органів державного управління; 2) збірник правил, що регламентують виробничо-технічну діяльність.

Інструкція — правовий акт, який створюється органами державного управління для встановлення правил, що регулюють організаційні, науково-технічні, технологічні, фінансові та інші спеціальні сторони діяльності та відносин установ, закладів, підприємств, службових осіб.

Інструкція має реквізити, назву документа (інструкція); гриф затвердження; заголовок (сюди іноді входить назва документа); дату; індекс; місце видання; текст; підпис.

Текст викладається у вказівно-наказовому стилі з формулюваннями типу «винний», «слід», «необхідно», «не дозволено». Текст документа має бути стислий, точний, зрозумілий, оскільки він призначений для постійного користування. Зміст викладається від 2-ї, 3-ї особи, рідше — у безособовій формі.

Статистичні матеріали – відомості про розвиток народного господарства, подані у вигляді таблиць, узагальнених у щорічних статистичних збірниках, що видаються Державним комітетом статистики України. Статистичні матеріали складаються з економічних, демографічних, соціальних та інших матеріалів.

Документальні джерела інформації дають змогу досліджувати об'єкти за певною періодизацією, тобто у динаміці за періодами. Це необхідно для вивчення і зіставлення факторів, які позитивно чи

негативно впливають на господарську діяльність підприємств.

Група *інших матеріалів* представлена науково-популярними, рекламними, патентно-ліцензійними, довідковими, бібліографічними, виробничими матеріалами тощо.

Науково-популярні матеріали – це брошури та книги з окремих питань, призначені для пропаганди наукових знань серед широкого кола читачів, зайнятих насамперед у матеріальному виробництві.

Рекламні джерела інформації – це відомості про вироби, послуги, які пропонуються з метою залучення покупця.

Патентно-ліцензійні джерела інформації – це права на використання інтелектуальної власності або трудову діяльність у певній сфері економіки.

Довідники – це довідкові видання, які мають прикладний, практичний характер, мають систематизовану структуру або побудовані за алфавітом заголовків статей.

Бібліографічні джерела інформації – це видання книжного або журнального типу, які включають науковий, систематизований перелік і опис друкованих видань.

До *рукописних документів* відносять носії інформації, які не пройшли редакційно-видавничу обробку і не виготовлені поліграфічним способом (дисертації, науково-технічні звіти, документи обліку господарської діяльності тощо).

Дисертація – є кваліфікаційною науковою працею у вигляді спеціально підготовленого рукопису або опублікованої монографії. Підготовлена до захисту дисертація повинна містити висунуті здобувачем науково обґрунтовані теоретичні або експериментальні результати, наукові положення, а також характеризуватися єдністю змісту і свідчити про особистий внесок здобувача в науку.

Звіт з науково-дослідної роботи (НДР) – науково-технічний документ, який містить систематизовані дані про науково-дослідну роботу, описує процес чи результати науково-технічного дослідження. Звіт з НДР є рукописною працею, яка, як правило, оформлюється і розмножується в обмеженій кількості екземплярів (від трьох до п'яти). Обсяг звіту може коливатися від декількох аркушів, які оформляються у вигляді брошури, до декількох сотень аркушів, які оформляються у вигляді однієї чи декількох книг.

Особливим видом рукописних документів є *депоновані твори*. Депонованими називаються наукові роботи, розраховані на обмежене коло користувачів. Депонування здійснюється централізовано органами науково-технічної інформації, функції яких в Україні виконує Інститут науково-технічної і економічної інформації. Відомості про депоновані твори оперативно наводяться у реферативних та інших журналах.

Депонування здійснюється з метою ознайомлення вчених і спеціалістів з рукописами статей, оглядів, монографій, матеріалів конференцій, з'їздів, нарад і симпозіумів вузькоспеціального характеру, які недоцільно видавати масово (як книги, журнали, брошури).

«Авторитетними» вважаються джерела (АД на відміну від ОД — оригінальних джерел, які, як правило, не є перевіреними, підтвердженими іншими незалежними джерелами), які зберігають редакційну цілісність, що дозволяє верифікувати інформацію. Ці джерела охоплюють опубліковані праці у будь-якому вигляді (паперовому чи електронному) всіма мовами.

У науковій діяльності застосовується поділ документальних джерел інформації на дві категорії: *первинні, вторинні, третинні*.

Первинні джерела інформації мають переважно нові науково-технічні відомості, які є результатом науково-дослідної, проектно-

конструкторської і практичної діяльності (відображають господарські операції) або нове осмислення відомих ідей і фактів. Первинне джерело — це документ або людина, що надають прямі докази фактам, іншими словами, джерело, гранично близьке до описуваної ситуації. У нашій діяльності первинним джерелом є, наприклад, масив даних про об'єкт — експериментальних, диспетчерських тощо. Первинні джерела потребують грамотної обробки (наприклад, масиви експериментальних даних — обробки із застосуванням методів моделювання, математичної статистики), коментування, узагальнення. Первинні джерела — це ще не АД. Це тільки первинна інформація, на основі якої можуть сформуватися, а можуть і не сформуватися АД.

В науковій літературі первинним джерелом є також початкова публікація даних експерименту, дослідження, початкова публікація нової теорії, її обґрунтування і результати.

Вторинні джерела інформації є результатом опрацювання одного або декількох первинних документальних джерел. До вторинних джерел інформації відносять бібліографічні описи, анотації, реферати, огляди, довідкові та інформаційні видання, переклади, бібліотечні покажчики та картотеки.

Третинне джерело, своєю чергою, узагальнює вторинні. Енциклопедії в переважній більшості випадків є третинними джерелами.

Інформаційне забезпечення наукових досліджень

Проведення наукових досліджень вимагає відповідного інформаційного забезпечення. Забезпечення – це те, за допомогою чого створюються умови для реалізації вказаного процесу.

Інформаційне забезпечення – це сукупність інформації та способів її пошуку, обробки, накопичення, збереження, систематизації та

узагальнення з метою використання в процесі наукового дослідження.

Завданням інформаційного забезпечення є інформування науковців про стан об'єктів, що досліджуються. Крім того, інформаційне забезпечення є засобом комунікації (обміну інформацією) науковців.

Класифікувати інформаційне забезпечення науково-дослідного процесу можна за такими ознаками: *професійно-інформаційна комунікація*; *пізнавальність інформації*; *зміст інформаційного забезпечення*.

Комунікаційне забезпечення ґрунтується на професійно-інформаційних контактах науковців (конференції, симпозіуми, наради, наукові семінари тощо).

З точки зору пізнавального характеру інформації інформаційне забезпечення можна поділити на забезпечення *новою інформацією* та забезпечення *релевантною інформацією*, яка використовувалася раніше.

За змістом інформації інформаційне забезпечення науково-дослідного процесу поділяється на *законодавче* (закони і нормативні акти, Укази Президента України, Постанови та розпорядження Уряду України); *планове* (інформація з планів економічного і соціального розвитку); *нормативно-довідкове* (норми та нормативи); *договірне* (інформація з договорів між економічними суб'єктами); *технологічне* (технічна документація, стандарти, технічні умови, проектно-технічна документація); *організаційно-управлінське* (юридично-правові та організаційно-розпорядчі документи, службове листування); *фактографічне* (звітність, дані бухгалтерського, статистичного та оперативного обліку).

Пошук необхідної інформації

Наукові дослідження в будь-якій галузі науки повинні базуватися на

надійній та достовірній інформації. Обов'язковою вимогою до дослідника є всебічне та глибоке вивчення ним досвіду попередників, які займалися вирішенням як обраної, так і суміжних проблем.

На початковому етапі наукової роботи вивчення літературних джерел дозволяє обрати таконкретизувати тему дослідження, визначити його об'єкт, розробити теоретичні передумови майбутньої наукової роботи, допомагає визначити актуальність обраної теми дослідження. Інформаційна база дослідження відіграє важливу роль у створенні гіпотези, яка є відправною точкою у наукових дослідженнях.

Інформація відіграє визначальну роль у вивченні історії проблеми, що досліджується. Знання історії питання й методик дослідження, що використовувалася раніше, дозволяє уникнути дублювання виконаних робіт і повторення помилок, а також розглянути предмет у динаміці, простежити загальні тенденції та подальші шляхи його розвитку і на цій основі будувати науковий прогноз.

Для інформаційного пошуку необхідно використовувати інформаційні видання органів НТІ, автоматизовані інформаційно-пошукові системи, бази даних, банки даних, Internet. Дані пошуку можуть бути використані безпосередньо, однак найчастіше вони використовуються для виявлення первинних джерел інформації, якими є наукові праці (монографії, збірники) та інші, необхідні для наукової роботи видання. Так забезпечується повнота інформаційної бази дослідження.

Методика пошуку необхідної інформації складається з кількох етапів та передбачає пошук відповідей на чотири основні питання, які повинен ставити перед собою дослідник: *що?, де?, як (яким чином) шукати?, як опрацьовувати?*

Етап 1 (Що шукати?) – виділення основних проблем, питань, завдань теми дослідження та ключових понять.

Етап 2 (Де шукати?) – визначення переліку джерел, в яких може висвітлюватися інформація щодо виділених проблемних питань.

Етап 3 (Як шукати?) – вибір прийомів, за допомогою яких здійснюватиметься робота з обраними літературними джерелами (опрацювання каталогів бібліотек, робота в мережі Internet, робота з інформаційною базою тощо).

Етап 4 (Як опрацьовувати?) – одержання текстів (ксерокопіювання або ж читання) та їх безпосередня обробка.

Пошук інформації в бібліотеці

Бібліотека – культурно-освітній заклад, що збирає друковані та рукописні матеріали, здійснює їх спеціальне опрацювання, організовує збереження та забезпечення книгами читачів.

Бібліотечний фонд – це сукупність відповідним чином впорядкованих джерел інформації, нагромаджених за певний період часу, які підлягають обліку та зберіганню відповідно до чинного законодавства. Структура бібліотечних фондів може бути різною.

Бібліотечний фонд неможливо опрацювати, не використовуючи бібліотечні каталоги.

Бібліотечний каталог – це перелік творів друку й інших документів, наявних у фонді бібліотеки або групи бібліотек, складений у певному порядку, який є засобом повідомлення про склад і зміст бібліотечного фонду.

Алфавітному каталогу належить основне місце. За ним можна встановити наявність у бібліотеці творів того чи іншого автора або визначеної книги, автор чи назва якої відомі.

У систематичному каталозі картки згруповані в логічному порядку за окремими галузями знань. За його допомогою можна з'ясувати, за якими галузями знань та які саме видання є в бібліотеці,

підібрати необхідну літературу, а також встановити автора та назву книги, якщо відомий її зміст.

У предметному каталозі, як і у систематичному, література групується за її змістом. Однак на відміну від систематичного в предметному каталозі література об'єднана в певні рубрики незалежно від того, з яких позицій вони викладені. Через це в предметному каталозі в одному місці знаходяться матеріали, які в систематичному каталозі були б розкидані в різні ящики.

Неможливо не згадати про *картотеку*, що є переліком всіх матеріалів за окремо визначеною тематикою. Бібліотечні каталоги та картотеки не існують окремо, навпаки, вони пов'язані та взаємно доповнюють один одного, полегшують читачам пошук необхідного джерела та максимально повно відтворюють бібліотечний фонд.

Комп'ютерні технології пошуку інформації

Сучасні технології дозволяють здійснювати пошук інформації через мережу Internet за допомогою пошукових систем та у бібліотеках.

Мережа Internet є глобальною системою з'єднаних комп'ютерних мереж, складовими якої є електронна пошта та всесвітня мережа www (аббревіатура від World Wide Web – світове павутиння). Головним принципом використання Internet є відкритість. Internet складається з сотень вільно об'єднаних мереж, і немає жодної окремої групи людей або організації, що відповідають за його роботу. Багато компаній цілодобово працюють в Internet, а інші підключають свої комп'ютери до Internet тимчасово. В цьому полягає одна з найвагоміших переваг Internet – він може працювати, коли окремі комп'ютери не підключені до мережі або пошкоджені.

Всесвітня мережа www – всесвітньо розподілена база гіпертекстових документів. На кожному комп'ютері, що має постійне підключення до Internet, можна розмістити документи, які планується зробити загальнодоступними. Тоді цей комп'ютер стає Web–сервером. Для перегляду змісту серверів користувач повинен мати спеціальну програму – Web – браузер.

При здійсненні пошуку необхідної інформації в Internet є декілька методів. По-перше, слід скористатися каталогами Internet – ресурсів, що містять вже згруповану інформацію у вигляді посилань на Web – сервери.

Прикладами таких англомовних каталогів є www.yahoo.com, www.altavista.com, www.google.com, українських – www.meta-ukraine.com.

Через Internet можна знайти книги, журнали, дисертації, автореферати, статті, матеріали конференцій та іншу потрібну для наукової роботи літературу. Корисність цього способу полягає у тому, що можна працювати з каталогами бібліотек без відриву від роботи. Перед відвіданням бібліотеки для роботи з літературою проводиться пошук джерел, який можна здійснювати як в систематичному, так і в алфавітному каталогах.

При пошуку інформації в Internet – бібліотеках використовуються загальні правила пошуку інформації в електронних базах даних.

Отже, ми черпаємо інформацію з Інтернету користуючись в основному ВТОРИННИМИ та ТРЕТИННИМИ джерелами. При цьому третинні джерела майже завжди – беззаперечні (якщо вони не застарілі). А от у вторинних джерелах, як то кажуть, "є варіанти".

Ось на цих варіантах важливо зупинитися.

- **Наукові статті.**

У кінці ХХ ст. належить чи не належить стаття до АД визначав Всесоюзный институт научной и технической информации (ВИНИТИ) та його аналоги (наприклад, ЦНИЭИуголь). Ці інститути готували перелік наукових статей за галузями, які видавали (а в РФ видаються і сьогодні) у спеціальних грубих (тобто великого обсягу) Реферативних журналах). При такій системі наукові співробітники змушені витратити майже 50 % свого робочого часу на інформаційну діяльність у пошуках надійних джерел, тематичних оглядах (щоб бути на "вістрі прогресу").

У ХХІ ст. Західний Світ + Китай, Індія та ін. розвинені країни перейшли до іншої критеріальної парадигми сортування джерел "АД - ОД". Утворилися НАУКОМЕТРИЧНІ БАЗИ ДАНИХ, які є організовані і оперативно ведуться спеціальними інститутами та інформаційними службами. Наприклад, База даних Scopus індексує наукові журнали, матеріали конференцій та серійні книжкові видання. Розробником та власником SciVerse Scopus є видавнича корпорація Elsevier. В додаток до можливостей РЕФЕРАТИВНИХ ЖУРНАЛІВ комп'ютеризація цього процесу та Інтернет дає змогу швидко віднайти потрібну публікацію, визначити їх рейтинг, рейтинг журналу (Імпакт фактор), рейтинг автора (індекс Гірша) тощо.

За версією Open Science in Ukraine всі наукометричні бази даних можна класифікувати за складністю реєстрації на три категорії: А, В, С.¹

«КАТЕГОРІЯ А». ЛЕГКА РЕЄСТРАЦІЯ. Це бази-каталоги наукових журналів, які порівняно швидко розглянуть заявку редакції на реєстрацію. Крім того, багато з подібних баз мають тенденцію

самостійно експортувати метадані наукових журналів з інших баз, архівів, сховищ тощо., Що створює ефект «снігової кулі», широко поширюючи відомості про журнал в мережі Інтернет. Баз даних категорії «А»:

- Universe Impact Factor,
- Global Impact Factor,
- CiteFactor,
- Sindexs,
- Ukrainian scientific journals,
- General Impact Factor,
- Electronic Journals Library,
- MIAR 2015 року,
- Cosmos impact factor та ін.

«КАТЕГОРІЯ В». РЕЄСТРАЦІЯ СЕРЕДНЬОЇ СКЛАДНОСТІ. Це більш вимогливі бази даних, які, як правило, мають свої алгоритми розрахунку Impact factor, а також побудовані на ньому рейтинги. Терміни розгляду заявок в даних базах коливаються від 1 місяця до півроку або навіть 1 року. Реєстрація в базах робить журнал авторитетним в очах широкого кола наукової громадськості, а індексація в деяких з них служить своєрідною «сходиною» перед початком індексації в Scopus і Web of Science. Баз даних категорії «В»:

- Index Copernicus,
- Open Academic Journals Index,
- E-Library, DOAJ,
- UlrichsWeb,

- EBSCOhost,
- National Library of Ukraine Vernadsky та ін.

«КАТЕГОРІЯ С». СКЛАДНА РЕЄСТРАЦІЯ. Це наукометричні бази даних Scopus і Web of Science — найвпливовіші наукометричні бази даних, реєстрація в яких може стати результатом багатьох років кропіткої роботи по поліпшенню якості наукових статей, підвищенню рівня інтеграції журналу і його авторів в світове дослідницьке співтовариство, застосування численних стандартів оформлення наукової інформації. Модерація журналів тут найсуворіша, а вимоги найжорсткіші. Заявки розглядаються більше року або протягом декількох років. Індексація в цих базах свідчить про найвищий визнання журналу в науковому середовищі.

Всередині цих наукометричних баз є своя градація значимості наукових журналів. Наприклад, у Скопус існує класифікація журналів на квартилі – за мірою значущості журналу Q1, Q2, Q3 і Q4.

Яким же виданням, якій інформації довіряти? Звичайно, – наукометричній найбільше (до 100%). І чим авторитетніша наукометрична база – тим більша довіра до інформації. Заслужують на увагу і довіру фахові періодичні видання ВИШів України – за списком МОН. Але тут додатково треба враховувати рейтинг самого ВИШу і рейтинг авторів.

У окремих випадках можна користуватися і іншими виданнями – не зареєстрованими у МОН і на наукометричних сторінках виданнями. Тут головне – фаховий рівень автора.

- **Посібники, підручники, конспекти лекцій. Монографії**

Посібники, підручники, конспекти лекцій — це навчальна

література. Конспект лекцій — первинна, далі, по мірі вдосконалення — посібники і підручники. У вітчизняних традиціях ці видання повинні мати:

- [ISBN](#) (з англ. International Standard Book Number — міжнародний стандартний номер книги) універсальний ідентифікаційний номер, що присвоюється книзі або брошурі з метою їх ідентифікації.
- Рецензентів — як правило, кандидатів і докторів наук з різних організацій, бажано і науковців, і практиків
- Рекомендацію ВЧЕНОЇ РАДИ ВИШу або Інституту до друку
- Видавництво, яке має право на друк (zareєстроване Книжковою Палатою України)

Бажаний електронний друк в Електронних бібліотеках України, Репозитаріях ВИШів.

При цьому, видання без ISBN не вважаються друкованими працями. І вони не рекомендуються.

Велике значення має рік видання навчальної книги. У кожній з галузей має місце свій темп суттєвого оновлення, інновацій. Наприклад, у ІТ-технологіях інформація застаріває вже за рік-півтора, у енергетичній, електротехнічній, гірничій, інженерії за оцінками — за 3-5 років. Тому з такою ж частотою повинні підновлюватися і навчальні видання.

Монографії («наукове дослідження, присвячене одній темі» англ. monograph, нім. і фр. monographie від грец. μόνος «один, єдиний» та γράφω «пишу») — наукова праця, що належить одному чи кільком авторам, у вигляді книги з поглибленим вивченням однієї або кількох (тісно пов'язаних між собою) тем.

Крім зазначених вище вимог монографія повинна не мати плагіатних елементів.

У інтернет-мережі існують портали для науковців, наприклад, ResearchGate (дослідницька брама) — науковий портал та соціальна мережа, засіб співробітництва між науковцями з будь-яких наукових дисциплін. ResearchGate містить вебзастосунки, включаючи семантичний пошук (пошук по резюме), обмін файлами, спільне користування базою публікацій, форуми, методологічні дискусії, групи тощо. Члени можуть створювати свій персональний блог у межах мережі.

Порядок обробки та групування інформації

Згідно з обраною темою наукової роботи дослідник самостійно підбирає літературні джерела (книги, брошури, статті), офіційні документи, накопичує відомчі матеріали з теми та опрацьовує їх. Порядок роботи над літературними джерелами включає бібліографічний пошук літератури з теми досліджень, її вивчення, фіксацію початкових даних і їх використання у процесі наукового дослідження для створення нових знань.

Робота з друкованими та електронними джерелами інформації передбачає: загальне ознайомлення (ознайомлення зі змістом і швидкий перегляд джерела); уважне читання по розділах (виділення найважливішого тексту); вибіркове читання тексту (перечитування найважливішого); складання плану прочитаного матеріалу (постановка проблем); виписка з прочитаного (повніше та чіткіше – цитата і бібліографічний опис із зазначенням тих сторінок, звідки взята цитата); оформлення картотек (бібліографічна картотека, картотека виписок, картотека рефератів, картотека іноземної літератури); зіставлення та

критична оцінка прочитаного (запис зауважень).

При роботі із друкованими та електронними джерелами інформації дослідник робить виписки окремих речень або абзаців. При цьому необхідно уникати накопичення матеріалу, що не стосується обраної теми та об'єкта дослідження.

Досвід свідчить, що приблизно 30-40 % літературних джерел, початково відібраних за їх назвою, виявляються некорисними при роботі над темою.

У процесі роботи над джерелами з'являються власні висновки, оцінки, узагальнення, передбачення у використанні інформації. Коли виписки здійснюються рукописним способом, їх необхідно записувати й виділяти в тексті позначками на полі у квадратних дужках або записувати іншим кольором. У цьому випадку окремі положення краще фіксувати на аркушах паперу тільки з одного боку, залишаючи великі поля. Це дає змогу у необхідних випадках робити додаткові вставки, паралельні виписки з інших книг для порівняння, а також викладу власної думки з цього питання. З цією метою можна використати картки з картону або цупкого паперу, наприклад, які зручно групувати за однорідністю питань, що вивчаються. Доцільно робити кольорові або шрифтові виділення нотаток.

Однак у сучасних умовах набагато краще та зручніше використовувати для роботи над текстом персональний комп'ютер та спеціальне програмне забезпечення – текстові редактори, наприклад, *Microsoft Word*.

При використанні комп'ютера процес початкового накопичення інформації значно спрощується. Виписки можна робити власноручно, записуючи текст у відповідний текстовий файл. Інший шлях – це сканування великих частин тексту сканером, а потім за необхідності його правка та коментар. Можна також використовувати програми для

автоматичного перекладу.

Незалежно від того, на якому носії (електронному чи на паперовому) зафіксована інформація із літературного джерела, вона повинна бути згрупована за однорідними ознаками для використання в процесі дослідження. Такою ознакою здебільшого є питання, які містяться у плані теми дослідження.

Записи на паперових картках зручно групувати у спеціальні картотеки, але вони повинні мати картонні розподільники з індикаторами за планом дослідження. При використанні комп'ютерів варто накопичувати виписки в окремих файлах, що відповідають розділам роботи. Потім, у процесі вторинного групування матеріалу, необхідний текст буде переноситися в основний файл наукової роботи.

У ході дослідження дослідник опрацьовує велику кількість літературних джерел, інформацію з яких неможливо запам'ятати чи виписати в повному обсязі, тому необхідно при її обробці використовувати такі способи фіксації інформації: ***анотація; резюме; тези; реферат; цитата; конспект; покажчики.***

Анотація є стислою характеристикою книги, статті, рукопису тощо. За своїм характером анотації можуть бути *довідковими* та *рекомендаційними*, тобто такими, які містять критичну оцінку твору. Виходячи з вимог до анотації, її обсяг може бути від декількох слів до 10-15 рядків.

Резюме – це короткий підсумок прочитаного твору, в якому містяться висновки та головні підсумки.

Тези – положення, які коротко викладають одну з основних думок лекції, доповіді тощо. Тези подаються у формі логічних суджень. Тези поділяють на основні, прості та складні. Прості тези записують при першому ознайомленні з текстом (іноді їх записують у вигляді цитат).

Основні тези часто створюються на основі простих, шляхом їх узагальнення, переробки й виключення окремих положень.

Цитата – дослівний уривок з твору певного автора, що наводиться для підтвердження або заперечення висловлюваної думки. Шляхом цитування слід оформлювати найважливіші фрагменти авторського тексту. Українське законодавство надає наступне визначення: «Цитата — порівняно короткий уривок з літературного, наукового чи будь-якого іншого опублікованого твору, який використовується, з обов'язковим посиланням на його автора і джерела цитування, іншою особою у своєму творі з метою зробити зрозумілішими свої твердження або для посилання на погляди іншого автора в автентичному формулюванні.»²

Реферат – це скорочений виклад змісту наукового твору з основними даними та висновками. Реферат – це не механічний переказ роботи, а виклад її суті.

Посторінкові покажчики джерел. У процесі ознайомлення з джерелами інформації не потрібно поспішати відразу ж конспектувати прочитане, а доцільно складати посторінкові покажчики до джерел, які вивчаються. Дуже часто застосовують такий засіб обробки джерел як складання посторінкового списку (покажчика) цитат, які намагаються виписати. Потім, закінчивши читання книги, роблять виписки або складають конспект.

Сутність, мета, завдання та етапи теоретичного аналізу проблеми

Теоретичний рівень наукового аналізу пов'язаний з глибоким аналізом наукових фактів, з проникненням в сутність явищ, що досліджуються, з пізнанням та формулюванням законів науки, тобто з

поясненням предметів і процесів реальної дійсності. Результати теоретичного дослідження знаходять своє вираження в таких формах, як **науковий закон, теорія, наукова гіпотеза**.

Науковий закон – внутрішній суттєвий та стійкий зв'язок явищ, що обумовлює їх впорядковану зміну. Вербальне та/або математично виражене твердження, що має докази (на відміну від аксіоми). Узагальнення, що ґрунтується на емпіричному спостереженні за поведінкою природних тіл, яке вважається універсальним і незмінним явищем фізичного світу. Стійкий повторюваний зв'язок між явищами, процесами та станами матерії.

Теорія – система узагальненого достовірного знання про той чи інший «фрагмент» дійсності, яка описує, пояснює та передбачає функціонування визначеної сукупності об'єктів, що його складають. Сукупність висновків, що відображає відносини і зв'язки між явищами реальності у вигляді інформаційної моделі. Теорією стає *гіпотеза*, що має відтворюване підтвердження явищ та механізмів і дозволяє спостерігачу прогнозувати наслідки дій чи зміни стану об'єкта спостережень.

Гіпотеза (засновок) – це припущення, яке перевіряють експериментально з можливих розв'язань наукової проблеми; система умовиводів, за допомогою яких на основі ряду фактів робиться висновок про існування об'єкта, зв'язки або причини явища, причому цей висновок не можна вважати абсолютно достовірним.

Гіпотеза вважається науковою, якщо вона, відповідно до наукового методу, пояснює факти, що охоплюються цією гіпотезою; не є логічно суперечливою; принципово спростовується, тобто потенційно може бути перевірена критичним експериментом; не суперечить раніше встановленим законам і, швидше за все, додається до ширшого кола

явищ.

На основі емпіричних даних на теоретичному рівні дослідження відбувається об'єднання за допомогою думки об'єктів, що досліджуються, осягнення їх сутності, законів їх існування, які становлять основний зміст теорій. Таким чином на теоретичному рівні дослідження за допомогою специфічних методів вирішуються свої пізнавальні завдання. По-перше, дослідник пізнає сутність об'єктів, що вивчаються; по-друге, на теоретичному рівні відбувається осягнення об'єктивної істини у всій її конкретності та повноті змісту. На основі теоретично-го пояснення та пізнаних законів відбувається наукове передбачення майбутнього.

Таким чином, *метою теоретичних досліджень* є виявлення істотних зв'язків між об'єктом, що досліджується, та оточуючим середовищем, пояснення та узагальнення результатів емпіричного дослідження, виявлення загальних закономірностей та їх формалізація.

Теоретичне дослідження завершується формуванням *теорії* – системи наукових достовірних знань у формі тверджень і доведень, яка не обов'язково пов'язана з побудовою її математичного апарату.

Теоретичне дослідження технічного об'єкта може включати такі процедури:

- аналіз сутності процесів, явищ;
- формулювання припущення;
- формулювання гіпотези дослідження;
- побудову (розроблення) фізичної або математичної моделі;
- проведення аналітичного дослідження результатів моделювання;
- формулювання і аналіз теоретичних положень.

Якщо не можна виконати математичне дослідження, то робоча гіпотеза формулюється в словесній (описовій) формі із залученням графіків, таблиць тощо.

Теоретичні дослідження відіграють велику роль у процесі пізнання об'єктивної дійсності, оскільки вони дозволяють глибоко проникнути у сутність природних явищ, створюють наукову картину світу, що постійно розвивається. Теоретичні дослідження є функцією мислення, яка полягає в тому, щоб відкривати, перевіряти, частково освоювати різні області природи, створювати та розвивати світобачення.

Методи теоретичного аналізу

До основних загальнонаукових методів, які використовуються на теоретичному рівні дослідження, можуть бути віднесені розглянуті вище методи:

аналізу та синтезу,

індукції і дедукції,

сходження від абстрактного до конкретного,

ідеалізації та формалізації,

системний підхід.

При розробленні теорій поряд з цими методами використовуються й інші методи. Так, значну роль при побудові будь-яких теорій відіграють, наприклад, *логічні закони*, що мають нормативний характер. До цих законів відносять: *закон тотожності, закон протиріччя, закон виключення третього та закон достатньої підстави.*

Закон тотожності визначає, що предмет думки в межах одного міркування повинен лишатися незмінним $A \in A$ ($A = A$), де A – це думка.

Цей закон потребує, щоб у повідомленні всі поняття і судження мали однозначний характер, виключали багатозначність і невизначеність.

Згідно із **законом протиріччя** не можуть бути одночасно істинними два висновки, один з яких щось стверджує, а другий заперечує те саме. Закон стверджує: «неправильно, що A і не A одночасно істинні».

Основою закону протиріччя є якісна визначеність речей і явищ, відносна стійкість їх властивостей. Свідоме використання цього закону допомагає виявити і ліквідувати протиріччя в поясненні фактів і явищ, виробити критичне ставлення до будь-якого роду неточностей і непослідовностей в отриманій інформації.

Закон виключення третього стверджує, що з двох суперечливих суджень одне помилкове, а друге істинне. Третього не дано. Він виражається формулою: « A є або B , або не B ». Наприклад, якщо правильним є судження «Наш університет є державним навчальним закладом», то судження «Наш університет не є державним навчальним закладом» – помилкове.

Вимогу доказовості наукових висновків, обґрунтованості суджень виражає **закон достатньої підстави**, який формулюється таким чином: будь-яка слушна думка дає достатньо підстав для свого обґрунтування.

Спеціальними принципами побудови теорій слугують також **принципи формування аксіоматичних теорій** (тобто теорій, які побудовані на деякій множині тверджень, що приймаються без доведень, – аксіом, а всі інші знання виводяться з них відповідно до певних логічних правил), що базуються на критеріях несуперечності, повноти та незалежності систем аксіом та гіпотез.

Використання математичних методів у дослідженнях

Вирішення наукових завдань за допомогою математичних методів здійснюється шляхом математичного формулювання завдання (розроблення математичної моделі), вибору методу дослідження одержаної

математичної моделі, аналізу одержаного математичного результату.

Математичне формулювання завдання, як правило, подається у вигляді чисел, геометричних образів, функцій, систем рівнянь тощо.

Математична модель є системою математичних співвідношень – формул, функцій, рівнянь, систем рівнянь, що описують ті або інші сторони об'єкта, який вивчається, явища, процесу.

Першим етапом математичного моделювання є постановка завдання, визначення об'єкта та цілей дослідження, визначення критеріїв (ознак) вивчення об'єктів та управління ними.

Наступним етапом моделювання є вибір типу математичної моделі. Звичайно послідовно будується кілька моделей. Порівняння результатів їх дослідження з реальністю дозволяє встановити найкращу з них.

Процес вибору математичної моделі об'єкта закінчується **етапом її попереднього контролю**. При цьому здійснюються такі види контролю: розмірностей; порядків; характеру залежностей; екстремальних ситуацій; граничних умов; математичної замкненості; фізичного сенсу; стійкості моделі.

Після математичного формулювання завдання (розроблення математичної моделі) здійснюють **етап вибору методу дослідження одержаної математичної моделі**.

Вибір методу дослідження математичної моделі безпосередньо пов'язаний з такими поняттями, як зовнішня та внутрішня правдоподібність.

Під **зовнішньою правдоподібністю** дослідження математичної моделі розуміється очікуваний ступінь адекватності математичної моделі реальному об'єкту стосовно якостей, які цікавлять дослідника. Це ступінь адекватності, в якій результати дослідження можуть бути

поширені на інші (зовнішні) ситуації.

Під **внутрішньою правдоподібністю** дослідження математичної моделі розуміється очікуваний ступінь точності рішення одержаних рівнянь, які прийняті за математичну модель, об'єкт.

Вибір методу дослідження математичної моделі багато в чому визначається її видом. Статичні системи, що представлені за допомогою алгебраїчних рівнянь, досліджуються за допомогою визначників, **методу ітерацій, методів Крамера і Гауса**. У разі труднощів з аналітичними рішеннями використовуються приблизні методи: **графічний метод; метод хорд; метод дотичних**.

Дослідження динамічних режимів функціонування об'єкта, що представлені за допомогою диференціальних рівнянь, також визначається класом, до якого належать ці рівняння. Для розв'язання диференціальних рівнянь використовують такі методи: **метод поділу змінних; метод підстановки; метод інтегруючого множника; метод якісного аналізу** тощо. Для одержання приблизних рішень використовують **метод послідовних наближень, метод функціональних рядів; метод Рунге – Кута; числові методи інтегрування** тощо.

ЛЕКЦІЯ 6. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АНАЛІЗУ

Принциповою особливістю системного аналізу є використання методів двох типів - формальних і неформальних (експертного знання). Останнє допомагає знайти нові шляхи вирішення проблеми, що не містяться у формальній моделі, і таким чином безперервно розвивати модель і процес ухвалення рішення, але одночасно бути джерелом протиріч, парадоксів, які інколи важко вирішити.

Основними методами системного аналізу є наступні методи:

- неформальні методи: методи «мозкової атаки», метод експертних оцінок, метод «Дельфі», діагностичні методи, морфологічні методи, метод дерева цілей;
- формалізовані методи:
 - статистичні: математична статистика, теорія вірогідності, теорія масового обслуговування;
 - графічні: матричні методи, мережеві методи;
 - аналітичні: методи як класичної математики, так і математичного програмування.

1. Методи «мозкової атаки». Методи даного типу мають основну мету - пошук нових ідей, їх широке обговорення і конструктивну критику. Основна гіпотеза полягає в припущенні, що серед великого числа ідей є, щонайменше, декілька хороших.

Метод «мозкової атаки» (brainstorming) складається з кількох етапів. На першому з них формується група провідних фахівців з галузі, для якої необхідно розв'язати певну проблему, яка спеціальне завдання (наприклад, винахідницьке з технології судно-будівництва) «перекладає» на звичайну, зрозумілу для нефахівців — «дилетантів» буденну мову.

На другому етапі формується й інструктується група учасників «мозкової атаки» з так званих дилетантів.

На третьому етапі проводиться сеанс «мозкової атаки» з чіткою і точною фіксацією всіх пропозицій щодо розв'язання завдання.

На четвертому етапі знов включається група фахівців для селекції пропозицій, які пролунали від нефахівців.

На п'ятому етапі проводиться спільне (за участю груп генерації та селекції) обговорення відібраних на попередньому етапі ідей.

На шостому етапі група фахівців розробляє робочі рекомендації за підсумками «мозкової атаки».

Сеанс «мозкового штурму» проводиться за певними правилами: по-перше, це правило безумовної підтримки будь-якої ідеї, навіть нікчемної або «божевільної»; по-друге, це правило «віднесеної за часом критики» (тобто критика, відбір найбільш плідних ідей проводиться фахівцями на четвертому етапі «мозкового штурму» без присутності генераторів ідей, тобто таким чином досягається мета критичного ставлення до ідей, а не до їхніх носіїв); по-третє, правило обмеження часу генерації ідей нефахівцями (за межами двох годин «мозковий штурм» стає непродуктивним унаслідок втоми його учасників); по-четверте, правило колективної інтелектуальної власності на відкриття і винаходи, отримані в процесі «мозкового штурму» (тобто навіть якщо використана лише одна ідея одного з учасників «мозкового штурму», авторство цієї ідеї належатиме всім, хто брав у ньому участь); по-п'яте, правило оптимальної кількості учасників «мозкового штурму» (кожна група, генерації ідей і селекції, повинна складатися з 6-12 осіб).

При всій простоті методу такі обговорення дають непогані результати.

2. Методи експертних оцінок. Основа цих методів - різні форми експертного опитування з подальшим оцінюванням і вибором найкращого варіанту. Можливість використання експертних оцінок, обґрунтування їх об'єктивності базується на тому, що невідома характеристика досліджуваного явища описується як випадкова величина, законом розподілу якої є

індивідуальна оцінка експерта про достовірність і значущість тієї або іншої події. При цьому передбачається, що дійсне значення досліджуваної характеристики знаходиться усередині діапазону оцінок, отриманих від групи експертів і що узагальнена колективна думка є достовірною.

Експерт – висококваліфікований спеціаліст, що знає особливості формування і розвитку об'єктів, і здатний дати достатньо надійні кількісні оцінки. Етапи експертизи:

1. формування мети;
2. розробка процедури експертизи;
3. формування групи експертів;
4. опитування;
5. аналіз і обробка інформації.

Найбільш спірним моментом в даних методиках є встановлення вагових коефіцієнтів по висловлюваних експертами оцінках і приведення суперечливих оцінок до деякої середньої величини. Дана група методів знаходить широке застосування в соціально-економічних дослідженнях.

При обробці матеріалів колективної експертної оцінки використовуються методи теорії рангової кореляції. Для кількісної оцінки міри узгодженості думок експертів застосовується коефіцієнт конкордації, який дозволяє оцінити, наскільки погоджені між собою ряди переваги, побудовані кожним експертом. Для наочності представлення міри узгодженості думок двох будь-яких експертів служить коефіцієнт парної рангової кореляції. Тип використовуваних процедур експертизи залежить від завдання оцінювання. До найбільш використовуваних процедур експертних вимірювань відносяться:

- ранжування;

- парне порівняння;
- множинні порівняння;
- безпосередня оцінка;
- класифікація;

Ранжування – процедура впорядкування деякої сукупності однорідних понять, які можна порівняти по певних властивостях в порядку зростання чи спадання їх переваги. Результатом є назначені експертом деякі числові оцінки для властивостей об’єктів.

Прикладом проведення ранжування властивостей об’єктів одним експертом є табл. 1.

Таблиця 1

№	Параметр	Вага	Об’єкт 1	Об’єкт 2	...	Об’єкт n
1		B1	B1,1	B1,2		
2		B2	B2,1	...		
...		...			...	
M		Bm				Bm,n
Сума		1	E1	E2	...	E n

де Об’єкт1, ..., Об’єкт n - об’єкти для порівняння (продукція, послуги, стратегії розвитку, які треба впорядкувати), максимальна кількість об’єктів 7 ± 2 ;

- Параметр – параметри за якими оцінюються Об’єкти (напр. ціна, якість, надійність, зовнішній вигляд....) кількість параметрів слід вибирати від 4 до 7, більше ускладнює точність оцінювання;

- Вага – вагові коефіцієнти між параметрами, визначають більш пріоритетні параметри Об’єкту. Коефіцієнт кожного параметру варіюється від 0,3 до 0.015 і в сумі дорівнюють 1.

- B1,1 ... Bm,n – виставлені експертом бали кожному з об’єктів по всіх параметрах;

- $E_1 \dots E_n$ – експертна оцінка кожного об’єкту – дорівнює сумі оцінок по кожному параметру даного об’єкта помноженої на ваговий коефіцієнт параметра, наприклад $E_1 = B_{1,1} * V_1 + B_{2,1} * V_2 + \dots + B_{m,1} * V_m$.

На основі результатів таблиці кожному об’єкту присвоюється ранг від 1 до n в порядку зростання величини експертної оцінки E .

Метод парного порівняння застосовується при груповому експертному порівнянні, коли ранжування не має сенсу або ускладнене через велику кількість даних і полягає у порівнянні між собою всіх можливих пар об’єктів. Результати парного порівняння представляються у вигляді матриці парних порівнянь.

	Об’єкт 1	Об’єкт 2	...	Об’єкт n	Сума
Об’єкт 1	1	$P_{1,2}$			E_1
Об’єкт 2	$P_{2,1}$	1			E_2
...			1		...
Об’єкт n				1	

Якщо Об’єкт $i >$ Об’єкт j , то у відповідній клітинці матриці ставимо $P_{i,j} = 1$. Якщо Об’єкт $i <$ Об’єкт j , то ставимо $P_{i,j} = 0$. По діагоналі таблиці будуть розміщені 1 (приклад – турнірна таблиця).

Кожен з експертів подає свою таблицю, на основі яких складають групову матрицю додаючи оцінки експертів по кожному об’єкту. Матриця, яка найкраще узгоджується з матрицями всіх окремих експертів називається медіанною. Сумарна оцінка об’єкта E – дорівнює сумі всіх оцінок у відповідному рядку таблиці.

Безпосереднє оцінювання. На відміну від ранжирування, яке дає лише порядкову шкалу порівняння альтернатив, безпосереднє оцінювання є процедурою, в якій альтернативам ставляться числові оцінки, що відображують умовні категорії їх якості (наприклад, бали). При цьому рівним за якістю альтернативам ставляться у відповідність однакові числа. Застосування цього методу вимагає високої кваліфікації і високої відповідальності експертів, тому рідко застосовується.

Класифікація є процесом розбиття множини альтернатив, що підлягають впорядкуванню або систематизації, на класи по тих або інших ознаках. При цьому класи і їх ознаки можуть бути визначені заздалегідь або в процесі класифікації.

Для кількісної оцінки міри узгодженості думок експертів застосовується коефіцієнт конкордації $0 < W < 1$, який дозволяє оцінити, наскільки погоджені між собою ряди переваг, побудовані кожним експертом.

Нехай внаслідок експертизи сформована таблиця рангів R для m об'єктів $n=4$ експертами:

Об'єкт	Експерт				R_i	d	$(R_i - \bar{R})^2$
	1	2	3	n=4			
1	R11	R12	R13	R14			
2	R21						
...	...			...			
M	Rm1			Rm4			
Сума					S	-	D

Розрахуємо:

$R_i = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + R_{i4}$ - загальний ранг по кожному об'єкту,

$\bar{R} = \frac{\sum R_i}{m}$ - середнє значення сум рангів всіх об'єктів,

$S = \sum R_i$ - загальна сума всіх рангів.

$d = R_i - \bar{R}$ - відхилення рангу об'єкта від середнього,

$D = \sum_{i=1}^m (R_i - \bar{R})^2$ - сума квадратів відхилень.

Тоді коефіцієнт конкордації:

$$W = \frac{12D}{n^2(m^3 - m)}$$

Якщо $W=1$ - повна узгодженість думок експертів. Якщо $W=0,7...0,8$ достовірність оцінки вважається хорошою.

Якщо характер аналізованої інформації такий, що доцільно отримати чисельні оцінки об'єктів, то можна використовувати який-небудь метод чисельної оцінки, починаючи від безпосередніх чисельних оцінок і кінчаючи тоншими методами Терстоуна і фон Неймана-Моргенштерна.

Слід зауважити, що необхідно, щоб експерти не просто заповнили таблиці опитувань, а виконали декілька кругів заповнення і обговорення отриманих параметрів, при якому експерти обмінюються думками. Інакше думка єдиного експерта, що знає щось дуже важливе і потрібне (наприклад - ніколи не купувати машини 2005-го року, коли був потоп в Європі) не буде врахована.

3. Метод «Дельфі». Спочатку метод "Дельфі" був запропонований як одна з процедур при проведенні мозкової атаки і повинен допомогти понизити вплив психологічних чинників і підвищити об'єктивність оцінок експертів. Потім метод став використовуватися самостійно. Його основа - зворотний зв'язок, ознайомлення експертів з результатами попереднього туру і облік цих результатів при оцінці значущості експертів.

4. Діагностичними методами є прийоми обстеження системи, її підсистем з метою удосконалення форм і методів її роботи. Діагностичні методи застосовуються на етапі діагностики обстежуваного об'єкту і можуть застосовуватися також і на інших етапах для здобуття необхідної інформації, зокрема, на етапі формулювання проблеми, етапі аналізу структури системи. Мета використання діагностичних методів – це встановлення і вивчення ознак, що характеризують стан систем для передбачення можливих відхилень і запобігання порушенню нормального режиму функціонування системи.

5. Морфологічні методи. Основна ідея морфологічних методів – систематично знаходити всі можливі варіанти вирішення проблеми або реалізації системи шляхом комбінування виділених елементів або ознак. Найбільшого поширення знайшов метод морфологічного ящика (ММЯ). Ідея ММЯ полягає в тому, щоб визначити всі можливі параметри, від яких може залежати вирішення проблеми, представити їх у вигляді матриць-рядків, а

потім визначити в цьому морфологічному матриці-ящику всі можливі поєднання параметрів по одному з кожного рядка. Отримані таким чином варіанти можуть знову піддаватися оцінці і аналізу в цілях вибору найкращого. Морфологічний ящик може бути не лише двовимірним.

Алгоритм побудови морфоящика і отримання нової системи:

1. Вибрати цікаву для нас систему, визначити, що від неї вимагається (визначення мети).

2. Визначити суттєві складові та властивості цієї системи (елементи, функції і т.п.), тим самим отримати набір осей морфоящика. Оформити їх у вигляді таблиці.

3. Визначити можливі варіанти (можливі прояви) істотних складових, виявлених у пункті 2, та внести їх до осі морфоящика.

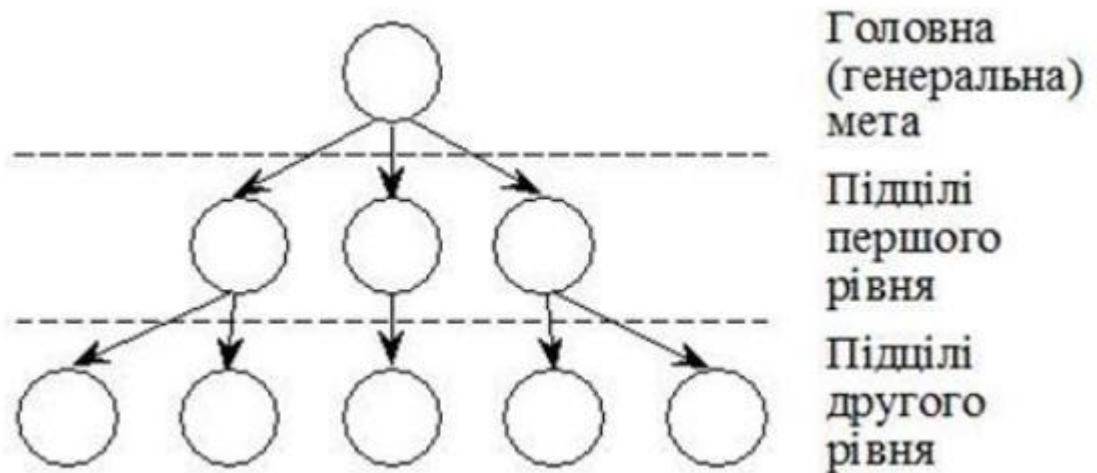
4. Вибрати поєднання. На основі обраних сполучень описати нову систему (ситуацію).

5. Представити отримані результати.

Ф. Цвіккі, що застосував у тридцять років морфологічний підхід до вирішення астрофізичних проблем і передбачив існування нейтронних зірок. Більш того, коли в роки війни його привернули до американських військових розробок ракет, Цвіккі отримав 576 варіантів ракетного двигуна, серед яких були і секретні німецькі літак-снаряд "Фау-1" і ракета "Фау-2".

6. Метод дерева цілей. Термін «дерево цілей» має на увазі використання ієрархічної структури, отриманої шляхом розділення загальної мети на підцілі, а їх у свою чергу, на детальніші складові, при цьому головну ціль розміщують на найвищому рівні. Деревом цілей є зв'язний граф, вершини якого інтерпретуються як цілі, а ребра або дуги як зв'язки між цілями. Основною вимогою до дерева цілей є відсутність циклів.

Перевагою цього методу є те, що він уможливорює поділ складного завдання, яке важко формалізувати, на сукупність простіших завдань, для розв'язання яких існують перевірені прийоми і методи.



Сфера застосування дерева цілей в даний час широка, але всі завдання, що вирішуються цим апаратом можуть бути об'єднані в наступні три класи:

- Опис даних: Дерева рішень дозволяють зберігати інформацію про дані в компактній формі.
- Класифікація: Дерева рішень відмінно справляються із завданнями класифікації, тобто віднесення об'єктів до одного із заздалегідь відомих класів. Цільова змінна повинна мати дискретні значення.
- Регресія: Якщо цільова змінна має неперервні значення, дерева рішень дозволяють встановити залежність цільової змінної від незалежних (вхідних) змінних. Наприклад, до цього класу відносяться завдання чисельного прогнозування (передбачення значень цільової змінної).

3.2. Формалізовані методи

1. Матричні методи. Матричні форми представлення і аналізу інформації широко використовуються як допоміжний засіб для аналізу систем і їх структур. Матриця є не лише наочною формою представлення інформації, але і формою, яка у багатьох випадках розкриває внутрішні зв'язки між елементами, допомагає з'ясувати і проаналізувати спостережувані частини структури. Прикладом використання властивостей матриці є таблиця Менделєєва.

2. Статистичні методи. Величини, які можуть набувати різних значень залежно від зовнішніх по відношенню до них умов, прийнято називати випадковими (стохастичними). Для випадкових величин доводиться використовувати особливі, статистичні методи їх опису. Залежно від типу випадкової величини - дискретна або неперервна це здійснюється по-різному. Дискретний опис полягає в тому, що вказуються всі можливі значення даної величини і для кожної з них вказується імовірність або частота спостережень конкретно цього значення при нескінченно великому числі всіх спостережень. До поняття імовірності значення дискретної випадкової величини можна підійти і іншим шляхом - через випадкові події. Це найбільш просте поняття в теорії імовірності і математичній статистиці - подія з імовірністю 0,5 або 50% в 50 випадках з 100 може відбутися або не відбутися якщо ж його імовірність більше 0,5 - воно частіше відбувається, ніж не відбувається. Події з імовірністю 1 називають достовірними, а з імовірністю 0 - неможливими. Звідси просте правило: для випадкової події X імовірності $P(X)$ (подія відбувається) і $P()$ (подія не відбувається), в сумі для простої події дають 1.

Коли доводиться мати справу з безперервно розподіленими випадковими величинами - вагами, відстанями і тому подібне, то для них принцип оцінки середнього значення (математичного очікування) і міри розсіяння (дисперсії) залишається тим же, що і для дискретних випадкових величин. Доводиться лише замість відповідних сум обчислювати інтеграли. Друга відмінність - для неперервної випадкової величини питання про те яка імовірність прийняття

нею конкретного значення зазвичай не має сенсу. Для всіх випадкових величин - дискретних і безперервно розподілених, дуже велике значення має питання про діапазон значень. Іноді інформація про імовірність того, що випадкова величина не перевищить деяку межу є єдиною можливою для використання в системному аналізі. Правило визначення імовірності попадання в діапазон дуже просте - треба підсумувати імовірність окремих дискретних значень діапазону або проінтегрувати криву розподілу на цьому діапазоні.

3. Мережеві методи. Мережеві методи є найбільш наочним і зручним засобом віддзеркалення динамічних процесів, що розвиваються в часі, їх аналізу і планування з включенням елементів оптимізації. Використовуються головним чином на етапі побудови програм розвитку. Елементи нижніх рівнів дерева цілей, перегруповані за ознакою тимчасових логічних взаємозв'язків, можна перетворити в мережу. Аналіз цих мереж може послужити для подальшого коректування дерев цілей. Складніші багатовимірні мережі використовуються для розподілу сфер відповідальності, розподілу робіт по конкретних виконавцях в організаціях, орієнтованих на мету.

4. Математичне програмування ("планування") - це розділ математики, що займається розробкою методів відшукування екстремальних значень функції, на аргументи якої накладені обмеження. Методи математичного програмування використовуються в економічних, організаційних, військових і ін. системах для вирішення так званих розподільних завдань. Розподільні завдання виникають у разі, коли ресурсів, що є в наявності, не вистачає для виконання кожної з запланованих робіт ефективним чином і необхідно щонайкраще розподілити ресурси по роботах відповідно до вибраного критерію оптимальності. Залежно від вигляду цільової функції і обмежень виділяють наступні методи математичного програмування:

5. Лінійне програмування, використовується якщо цільова функція лінійна і система обмежень також лінійна. Якщо рішення задачі лінійного

програмування мають бути цілими числами, то це завдання цілочисельного лінійного програмування. Якщо цільова функція і система обмежень не лінійні, то це завдання нелінійного програмування. В тому випадку, якщо в завданні математичного програмування є змінна часу і цільова функція виражається не в явному вигляді, як функція змінних, а побічно, через рівняння, що описує протікання операції в часі, то таке завдання є завданням динамічного програмування. Якщо цільова функція і система обмежень задаються формулами вигляду: $f(x) = \dots$, $g(x) = \dots$, то це завдання геометричного програмування. У завданнях параметричного програмування цільова функція і система обмежень залежать від параметрів. Якщо в цільовій функції і системі обмежень визначається область можливої зміни змінних, містяться випадкові величини, то таке завдання відноситься до завдань стохастичного програмування. Якщо точний оптимум знайти алгоритмічним шляхом неможливо, через велике число варіантів рішення, то використовуються методи евристичного програмування.

ЛЕКЦІЯ 7. ВИКОРИСТАННЯ У СИСТЕМНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ЗНАНЬ І ДОСВІДУ СПЕЦІАЛІСТІВ

Причини використання емпіричних методів аналізу Процес прийняття інженерного рішення, науково-технічного рішення передбачає внесення змін у параметри, структуру Тс, ТхС та виробничих систем, як результат попередньо проведеного інженерного, структурного аналізу, ФВА або математичного моделювання, польового (стендового) експерименту і визначення оптимального інженерного рішення. Проте на завжди для використання цих методів достатньо кількісних характеристик системи, математичних виразів, що описують закономірності роботи системи, відсутні програмні засоби або час на проведення чисельних (емпіричних) методів аналізу. В таких випадках використовують евристичні методи прийняття інженерних рішень Напрями використання експертних оцінок 1.Визначення цілей. При прийнятті інженерних рішень важливо чітко уявляти цілі, які необхідно досягнути керівнику у процесі управління підприємством, удосконалення ТС, ТхС та ВС. Задачі удосконалення, як відомо, багатоцільові, тому виникає необхідність визначення пріоритетності цілей і механізмів їх досягнення. А це може бути предметом оцінки експертів. 2.Експертний прогноз.

Особливе значення при прийнятті інженерних рішень належить проблемам, пов'язаним із оцінкою і прогнозом розвитку ТС, ТхС та виробничих ситуацій. Традиційні методи прогнозу не завжди можна використати (результати математичного моделювання, експериментальне дослідження). Експертні оцінки корисні у цих випадках, так як дозволяють отримати не тільки кількісні, але і якісні прогнозні дані поведінки системи. 3.Розробка сценаріїв розвитку ситуацій, що очікуються. 4.Генерування альтернативних варіантів інженерних рішень і дій. 5.Визначення різноманітних рейтингів.

Огляд методів організації і проведення експертиз

1. Методи індивідуальних експертних оцінок ґрунтуються на використанні думок експертів-фахівців незалежно один від одного. Найчастіше застосовуються методи інтерв'ю, анкетування, аналітичних експертних оцінок і т. д. За методом інтерв'ю експертові ставляться заздалегідь підготовлені питання, на які він дає відповіді. За методом анкетування експерт письмово відповідає на питання про об'єкт аналізу. Аналітичні експертні оцінки передбачають ретельну самостійну роботу над аналізом досліджуваного об'єкта чи процесу, результати якої експерт оформлює у вигляді доповідної записки. Основні переваги методів індивідуальних експертних оцінок – можливість максимального використання індивідуальних здібностей експерта й обмеженість психологічного тиску на нього. Методи колективних експертних оцінок ґрунтуються на принципах виявлення колективної думки експертів щодо об'єкта або процесу. При цьому група експертів може використовуватись для: – колективної роботи «за круглим столом» (метод комісій, мозкова атака тощо); – метод Делфі; – проведення ділової гри; – розробки сценарію дій щодо прийняття рішення; – побудови дерева рішень і т. ін. Отриману від експертів евристичну інформацію необхідно подати в якісній зрозумілій формі для обробки й аналізу. Для формалізації евристичної інформації експертів використовують спеціальні шкали вимірювання. Можна виділити такі види шкал (табл. 7.1): рангова, бальна відмінностей, бальна відношень, попарних порівнянь, вербально-числова шкала Е. Харінгтона

Таблиця 7.1 - Порівняння шкал для формалізації евристичної інформації

№ з/п	Ранжування	Бальна оцінка	Шкала Е. Харінгтона
1	Надвисоке	5	0,8–1
2	Високе	4	0,63–0,8
3	Середнє	3	0,37–0,63
4	Низьке	2	0,2–0,37
5	Надзвичайно низьке	1	0–0,2

Підготовка та проведення експертизи реалізуються у такій послідовності:

- 1) формування групи фахівців - аналітиків з питань цілей та проведення експертизи й аналізу результатів;
- 2) з'ясування мети експертизи й уточнення моделі об'єкта експертизи;
- 3) формування групи експертів;
- 4) формулювання питань в анкетах;
- 5) проведення безпосередньо експертизи;
- 6) обробка результатів експертизи;
- 7) аналіз отриманих результатів і формулювання остаточних оцінок;
- 8) розробка рекомендацій щодо прийняття необхідних рішень.

Основні причини, що погіршують точність експертних оцінок:

1. Використання некомпетентних експертів.
2. Недостатня підготовленість експертизи (низький організаційний рівень, нечітко визначені цілі, тощо).
3. Некоректна інтерпретація отриманих результатів.
4. Відсутність універсального програмного забезпечення системи підтримки проведення експертизи і обробки отриманих результатів.

Відбір експертів – це один з найважливіших етапів проведення експертизи. Експерти мусять задовольняти такі вимоги:

- а) бути спеціалістами в галузі проведення експертизи;
- б) мати високий рівень загальної ерудиції;
- в) критично сприймати минуле, адекватно розуміти тенденції і робити відповідні прогнози;
- г) бути психологічно стійкими, самокритичними;
- д) мати досвід роботи в даній галузі.

Під час відбору експертів ураховують абсолютну та відносну ефективність їх діяльності. Абсолютна ефективність – це відношення кількості правильно проведених експертиз до загальної кількості проведених. Відносна ефективність – це відношення абсолютної ефективності до середньої

абсолютної ефективності групи експертів. Перевагу має той експерт, діяльність якого характеризується більш високою абсолютною та відносною ефективністю. Ступінь вірогідності оцінок об'єктів виражається за допомогою вагових коефіцієнтів, що характеризують компетентність кожного експерта в даній проблемі. Вагові коефіцієнти компетентності q_j залежать від ступеня знайомства кожного експерта з аналізованою проблемою k_z і ступеня впливу різних джерел в аргументації на формування думки кожного експерта k_a : $q = \varphi(k_{zj}, k_{aj})$. Коефіцієнт аргументованості k_a визначається за формулою:

$$k_a = \frac{k_d + k_c}{2},$$

де k_d – коефіцієнт довіри, що встановлює відповідність між галуззю спеціалізації експерта, рівнем його спеціалізації і рівнем обговорюваної проблеми; k_c – коефіцієнт відповідності експерта пропонованим до нього вимогам, що характеризує творчі можливості експерта, його практичну і науковоорганізаційну роботу. Для визначення коефіцієнта k_c кожен експерт заповнює спеціальну таблицю, за якою нараховуються бали. Метод бальних оцінок передбачає використання бальної шкали, межі якої визначені та відомі експертам. Якщо експерти рівноправні (мають однакову вагу), то використовують найпростішу групову оцінку ($\bar{x}_i$), яка обчислюється як середньоарифметична бальних оцінок експерта для кожного i -го об'єкта експертизи за формулою:

$$X_{cp} = 1/L \cdot \sum X_{ij}$$

де L – кількість експертів

X_{ij} – оцінка кожного експерта, з врахуванням вагового коефіцієнта кожного експерта $X_{ij} = q_i \cdot$

X_{ij} Основні переваги методу бальних оцінок: – простота визначення групових оцінок об'єктів після проведення експертизи; – можливість урахувати компетентність експертів; – можливість аналізу за допомогою як

кількісних, так і якісних методів, що дозволяє порівняти результати. Якщо висновки збігаються, то можна констатувати, що вони достовірні і базуються на матеріалі експертизи, а не на методах обробки даних. Основні недоліки методу бальних оцінок: – труднощі отримання об’єктивних початкових оцінок c_{ij} ; – трудомісткість проведення дослідження.

Метод попарних порівнянь використовується тоді, коли експерти можуть порівняти об’єкти між собою попарно і встановити кращий об’єкт у кожній парі. Кожен експерт заповнює свою таблицю порівнянь. Порівнюючи об’єкти кожної пари між собою, експерт записує номер (і чи j) кращого об’єкта з кожної пари в клітинці, що міститься в і-му рядку та j-му стовпці. Існує метод повних попарних порівнянь (заповнюється вся таблиця) та частинних попарних порівнянь (заповнюється тільки одна половина таблиці). Після заповнення таблиці методом частинних попарних порівнянь розраховується f_{ij} – частота переваги і-го об’єкта за оцінкою j-го експерта (кількість чисел (і) в таблиці j-го експерта).

Таблиця 7.2 – Робоча таблиця для методу частинних попарних порівнянь

№ об’єкта	1	2	3		m
1	×	№	№	№	№
2		×	№	№	№
3			×	№	№
....				×	№
m					×

Середня частота переваги для і-го об’єкта за всіма експертами визначається за формулою:

$$f_i = 1/L \cdot \sum f_{ij}$$

де L – кількість експертів

f_{ij} – оцінка кожного експерта

Метод комісій складається з відкритої дискусії з проблеми, що вирішується, для подальшого отримання єдиного рішення експертів. При цьому колективний погляд визначається за результатами відкритого або таємного голосування. Переваги методу комісій: зростання інформованості експертів за рахунок участі в обговоренні проблеми. Недоліки методу комісій: відсутність анонімності може привести до конформізму; дискусія часто приймає характер полеміки найбільш авторитетних експертів. Метод ранжування. Експерти оцінюють якість об'єктів за допомогою встановлення їх рангу (порядкового номера об'єкта, якщо всі об'єкти розташовують у порядку зростання їх якості). Чим більшу (меншу) суму рангів отримає об'єкт від усіх експертів, тим вища (нижча) його якість. Сума рангів об'єкта обчислюється за формулою:

$$r_i = \sum_{j=1}^L r_{ij},$$

де r_{ij} – ранг об'єкта

Метод мозкового штурму представляє собою творчу співпрацю групи спеціалістів заради вирішення наукової проблеми. Основне призначення цього методу – пошук нових ідей. Організатори повинні утворити атмосферу найбільш сприятливу для генерування ідей. Для цього проблема, що обговорюється, повинна бути чітко сформульована. Метод мозкового штурму характеризується відкритим обговоренням поглядів і думок експертів з питань відносно рішення поставленої проблеми. При цьому необхідно дотримуватися наступних умов: - забороняється критика чужих тлумачень і думок; - дозволяється пропонувати будь які ідеї і варіанти вирішення поставленої проблеми без розрахунків можливості реалізації запропонованого рішення.

Всі ідеї фіксуються і після обговорення детально проробляються з метою виявлення раціональних моментів кожного з вислову експертів. Таким чином

можна знайти рішення складних проблем за відносно стислий термін.

Розрізняють такі види мозкового штурму:

- класичний мозковий штурм;
- анонімний мозковий штурм;
- дидактичний мозковий штурм;
- деструктивно-конструктивний мозковий штурм;
- метод "А також".

Класичний мозковий штурм - це метод роботи групи, згідно з яким першочерговою метою є швидкий пошук нових, альтернативних варіантів рішень визначеної проблеми. Він проводиться у формі групового засідання, у якому беруть участь не менш як 7-10 осіб. Всі проблеми прийнято умовно ділити на три основні характерних типи:

- аналітичні або причинні;
- синтетичні;
- проблеми вибору.

Тривалість процесу мозкового штурму зазвичай складає 2-3 год. Для проведення мозкового штурму необхідно виконати наступні умови:

чітко і однозначно визначити та сформулювати завдання, які необхідно вирішити;

учасники розміщуються за принципом "круглого столу".

Анонімний мозковий штурм передбачає збір пропозицій та ідей щодо проблеми до самого засідання. У цьому випадку учасників просять сформулювати і записати всі ідеї, що відносяться до проблеми, на листках паперу, та передають їх модератору засідання. Модератор оголошує всі ідеї по черзі (не вказуючи її автора), а група намагається розвинути її та вдосконалити. На відмінну від класичного мозкового штурму при анонімному на початковій фазі відсутній стимулюючий елемент - взаємний обмін думками. При дидактичному мозковому штурмі, до початку засідання, проблема відома лише модератору. Він поступово знайомить учасників з проблемою: спочатку викладає її загальні аспекти, а потім розглядає її

особливі умови. Такий розгляд проблеми може тривати протягом декількох засідань. Тільки до кінця серії засідань на основі численної систематизованої інформації учасники матимуть повне уявлення про проблему. Таким чином, завдяки застосуванню цього методу, учасники розглядають проблему більш ґрунтовно, утримуючись від прийняття поспішних рішень без урахування всіх її аспектів. Деструктивно-конструктивний мозковий штурм полягає в тому, що на першому етапі висвітлюються недоліки поточного вирішення проблеми. На другому етапі за правилами мозкового штурму здійснюється пошук нових кращих ідей щодо усунення виявлених недоліків. Метод "А також" являє собою варіант мозкового штурму, в якому будь яка висловлена ідея ґрунтовно обговорюється групою, перш ніж висуваються будь-які нові ідеї. Мета дискусії - виявити позитивні характеристики кожної ідеї. Техніка творчого співробітництва характеризується зміною групової й індивідуальної роботи. На початку протягом 10-15 хвилин здійснюється груповий мозковий штурм, після чого учасники розходяться для того, щоб протягом 5-10 хвилин подумати над проблемою самостійно, сформулювати нові ідеї та запропонувати рішення. 193 Метод Дельфи. Основні етапи методу Дельфи такі:

1. уточнення проблем або об'єктів для експертизи;
2. формування групи експертів;
3. розробка анкети для опитування експертів;
4. індивідуальне анкетне опитування експертів;
5. математичне опрацювання результатів опитування;
6. уточнення експертами своїх оцінок.

Для формування стійкої узагальненої оцінки, етапи 4, 5, 6 можуть проводитися 3-4 рази. Конкретний склад і чисельність групи експертів визначається характером аналізованих проблем, можливістю притягнення до експертизи компетентних спеціалістів. Ступінь компетентності експертів можна визначити за формулою:

$$K_k = \frac{K_s + K_a}{2}$$

де K_3 – коефіцієнт ступеня знайомства експерта з проблемою;

$K_3 \leq 1$; K_a – коефіцієнт аргументованості рішень експерта, $K_a \leq 1$.

Коефіцієнт ступеня знайомства K_3 визначається самооцінкою експерта за десятибальною шкалою і множенням оцінки на 0,1. Може бути використана така шкала оцінок ступеня знайомства експерта з проблемою: 0 балів - експерт не знайомий із проблемою; 1 - 3 бали - погано знайомий, але проблема входить до кола інтересів; 4 - 6 балів - задовільно знайомий, але практично не займається; 7 - 9 балів - добре знайомий і займається практично; 10 балів - вузький фахівець із проблеми. Для одержання значення K_a може бути використана шкала аргументованості, приведена в таблиці 3.17. Експерт відмічає відповідну графу по кожному виді джерел, а потім числа з відзначених граф підсумовуються.

Таблиця 3.17 – Шкала оцінок аргументованості думок експертів

Джерело аргументів	Ступінь впливу аргументів		
	високий	середній	низький
Теоретичний аналіз	0,3	0,2	0,1
Досвід	0,5	0,4	0,2
Література	0,1	0,08	0,04
Інтуїція	0,05	0,04	0,02

При упорядкуванні анкети необхідно дотримуватися таких вимог: - анкета не повинна містити багато питань; - відповіді на питання не повинні займати багато часу; - відповіді повинні даватися суворо в заданій шкалі оцінок; - анкета, як правило, повинна бути анонімною. Доцільно застосовувати 10 або 100 – бальні шкали оцінок із невеликим числом градацій, кожна градація повинна бути однозначно описана. Всі оцінки, отримані в ході опитування групи експертів, зводяться в матрицю:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \dots & C_{mn} \end{bmatrix}$$

При цьому деякі з оцінок можуть бути відсутніми, якщо експерт утримався від оцінки якогось чинника. Узагальнена оцінка важливості чинника обчислюється за формулою:

$$M_j = \frac{\sum_{i=1}^m c_{ij}}{m_j}, \quad j = 1, n,$$

де M_j – узагальнена оцінка важливості j -го чинника;

m_j – кількість експертів, що оцінили j -ий чинник,

($m_j \leq m$); c_{ij} – оцінка в балах, дана i -м експертом j -му чиннику .

Сума рангів оцінок, отриманих кожним чинником, дорівнює:

$$S_j = \sum_{i=1}^{m1} R_{ij}, \quad j = 1, n$$

де $m1$ – кількість експертів, що оцінили хоча б один чинник;

R_{ij} – ранг оцінки c_{ij} .

Ранг R_{ij} визначається у такий спосіб: 1. якщо оцінка c_{ij} експертом не поставлена, то приймається $c_{ij} = m_j$; 2. всі оцінки i -го експерта, що він виставив n чинникам, упорядковуються по зменшенню розміру оцінки і нумеруються від 1 до n ; 3. серед пронумерованих оцінок виявляються однакові оцінки, кожній із яких присвоюється однаковий ранг, рівний середньому арифметичному номерів оцінок; 4. ранги інших оцінок рівні номерам оцінок. Сума рангів S_j може бути обчислена після того, як проранжировані оцінки всіх експертів. Очевидно, що чим важливіший чинник, тим менше відповідна йому сума рангів. Крім узагальненої оцінки чинника може бути обчислений ступінь узгодженості думок експертів. Для цього визначають коефіцієнт варіації V_j оцінок, даних кожному чиннику.

$$V_j = \frac{G_j}{M_j},$$

де G_j – середньоквадратичне відхилення оцінок. Чим менше значення V_j , тим вище узгодженість думок експертів, ближче до об'єктивної істини.

ЛЕКЦІЯ 8 МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

Детерміновані моделі прийняття інженерних рішень.

Загальна характеристика детермінованих моделей Процес проектування сільськогосподарського виробництва передбачає розміщення, раціональних розмірів господарств різного типу і структури виробництва, проектування його матеріально-технічної бази, проведення аналізу і раціоналізації господарської діяльності, забезпечення екологічно сприятливого розвитку сільського господарства, формування системи інформаційного обслуговування і консультування виробників. Для прийняття обґрунтованих інженерних рішень потрібно застосовувати сучасні методи системного аналізу і багатокритеріальну оцінку результатів господарської діяльності, проводити інженерні або інженерно-економічні розрахунки, за допомогою яких виявляють наявні протиріччя і невідповідності, встановлюють числові значення керованих змінних і критеріїв, тобто готують прийняття раціонального рішення. Природно, що якість розрахунків зумовлює якість прийнятого рішення. Арсенал ефективних методів обґрунтування інженерних рішень є досить широким. На даний час в інженерній практиці найбільш поширені детерміновані розрахункові моделі. Детерміновані моделі прийняття рішень базуються на використанні аналітичних залежностей, які однозначно задають зв'язок вихідних даних з показниками ефективності рішення (критеріями). Тобто, для заданої сукупності вихідних даних може бути одержана єдина відповідь. Однозначність вихідних даних, до яких відносяться зовнішні умови, керовані та некеровані фактори, істотно спрощує задачу, але при цьому зростає ймовірність прийняття нераціонального рішення. Така ймовірність пов'язаних впливом на хід процесів випадкових факторів. Тому детерміновані моделі інколи є лише першим етапом прийняття рішення. Надалі оцінюються можливі зміни виробничої-ситуації, ймовірність виникнення екстремальних умов. Фактори ймовірнісної природи в

детермінованих моделях можуть бути задані середнім значенням (математичним сподіванням) випадкової величини, її екстремальним значенням, якщо ймовірність появи такого є істотною для досягнення мети, резервуванням ресурсів, а також коефіцієнтами, що враховують можливі несприятливі відхилення. Наприклад, у розрахунках необхідної кількості технічних засобів для проведення робіт в оптимальні агротехнічні строки можливість несприятливих погодних умов може бути врахована середньостатистичним коефіцієнтом погодності в заданому календарному періоді. Детерміновані моделі можуть бути лінійними і нелінійними, стаціонарними і динамічними, одно - і багатокритеріальними, оптимізаційними. Тому при виборі методу і розробці моделі прийняття рішення потрібно чітко уявляти значення і точності розрахунків, наслідки помилкових висновків, а також наявні можливості реалізації моделі. У загальну схему прийняття рішень можуть входити розрахунки з одно - і багатоваріантними відповідями. Приклади характерних задач інженерної служби, які можуть бути вирішені із застосуванням детермінованих моделей, наведені в табл. 8.1.

Одноваріантні розрахунки, як правило, не передбачають порівняння альтернатив, тобто прийняття рішення здійснюється на основі однозначної відповіді. В окремих випадках відповідь порівнюють з еталонними або граничними значеннями. Так, в розрахунках на міцність висновки можуть бути зроблені при порівнянні розрахункових напружень з гранично допустимими значеннями. Розрахункові показники машиновикористання можна порівняти з досягнутими, середніми або потенційно можливими величинами.

При багатоваріантних розрахунках прийняття рішень здійснюється на основі співставлення результатів для різних варіантів за встановленими критеріями, тобто має місце критеріальний вибір. У більшості інженерних задач закладена багатоваріантність, отже, і необхідність обґрунтування рішень. Так, при розробці плану механізованих робіт багатоваріантні

розрахунки виконують для вибору раціонального складу МТА (наприклад, за критерієм максимуму продуктивності або мінімуму приведених затрат). Якщо на задану технологічну операцію відсутні альтернативні варіанти МТА, то предмету вибору нема і розрахунок показників буде одноваріантним.

Таблиця 8.1 – Приклади розрахункових задач у сфері машиновикористання

Формулювання задачі	Зміст моделі
Обґрунтувати проект машинного двору господарства, який забезпечував би встановлення на зберігання, збереження і підготовку техніки до роботи з мінімально можливими приведеними затратами.	Обґрунтування варіантів структурно-функціональної схеми, будівель і двору. Розрахунки: виробничих площ, потреби в обладнанні та складу спеціалізованої служби машинного двору, затрат на ремонт і збереження техніки, кошторисної вартості варіантів. Розрахунок економічної ефективності і екологічності об'єктів.
Розробити інженерне забезпечення ресурсозберігаючої технології, яка дозволяла б досягти запрограмованих врожаїв з максимумом коефіцієнту енергетичної ефективності $[K_{\text{ет}}]$ технології.	Розрахунок потреби в техніці та ресурсах. Розрахунок енергетичних еквівалентів комплексу машин, затрат праці та матеріальних ресурсів. Розрахунок коефіцієнтів $K_{\text{ет}}$ для різних варіантів технології.
Запроектувати механізовані процеси для заготівлі кормів, забезпечивши максимум продуктивності праці	Оптимізувати склад збирально-транспортного комплексу. Узгодити взаємодію технічних засобів у просторі і часі.
Розробити річний план машиновикористання, забезпечивши своєчасне виконання робіт з мінімумом прямих затрат	Розрахунок складу і потреби в МТА. Розподіл техніки за видами робіт у межах календарного періоду при мінімальних питомих затратах. Розрахунок питомих приведених затрат для окремих операцій, періодів та за рік.
Визначити потребу в пересувних засобах ТО, забезпечивши виконання заданого обсягу робіт з мінімумом затрат на обслуговування	Розподіл обсягу робіт між стаціонарними та пересувними засобами ТО. Розрахунки: раціонального радіусу обслуговування, числа технічних засобів і персоналу, затрат для різних варіантів і вибір раціонального варіанту.
Встановити причину поломки деталі	Визначення режиму роботи і розрахунок деталі на міцність.

Багатоваріантність і необхідність проведення великого обсягу обчислень є основними причинами недостатнього обґрунтування інженерної документації та рішень, що приймаються. Для визначення потреби в техніці та ресурсах, а також основних показників використання МТА (виробіток, витрата пального, прямі затрати та ін.) необхідно провести 8-12 елементарних розрахунків на одній технологічній операції. Оскільки річний план механізованих робіт передбачає сотні операцій, багато з яких можуть бути виконані різним складом МТА, то кількість елементарних розрахунків виражається тисячами. Суттєво підняти рівень обґрунтованості інженерної документації та якості розрахунків можна при застосуванні комп'ютерів у складі АРМ інженера. Важливість розробки пакетів прикладних програм (ППП) для вирішення інженерних задач обумовлена ще й тим, що ряд одно- та багатоваріантних розрахунків приходить виконувати неодноразово. Так, показники машиновикористання розраховують декілька разів на рік, а при розробці плану механізованих робіт розрахунки проводять щорічно з їх коректуванням протягом року. Тому фахівцям інженерної служби важливо сформулювати PPP стосовно до своїх службових обов'язків.

Оптимізаційні моделі у практиці обґрунтування інженерних рішень важливе місце займають оптимізаційні задачі з використанням детермінованих моделей. Структура оптимізаційної моделі в загальному випадку включає цільову функцію яку необхідно мінімізувати або максимізувати, обмеження у вигляді рівнянь, обмеження у вигляді нерівностей, а також область S допустимих значень незалежних змінних. Для спрощення викладу будемо вважати, що оптимізація передбачає мінімізацію цільової функції $P(x)$. Тоді математичну модель у загальному вигляді можна записати так:

$$\begin{aligned}
F(x) &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min; \\
h_k(x) &= 0, k = 1, 2, \dots, K; \\
g_j(x) &\geq 0, j = 1, 2, \dots, J; \\
x_i^H &\leq x_i \leq x_i^B, i = 1, 2, \dots, N;
\end{aligned}$$

де та нижнє та верхнє значення i -ї змінної. Функція $F(x)$ може мати локальний і глобальний мінімуми (рис. 3.1, а). Локальний мінімум функції $P(x)$ існує в точці x_0 , якщо для всіх значень x у діапазоні справедлива нерівність $P(x) \geq P(x_0)$. Функція $P(x)$ має глобальний мінімум в точці x^* , якщо для всіх x справедлива нерівність $P(x) \geq P(x^*)$. Якщо функція $P(x)$ на відрізку має лише одну точку мінімуму x^* , по обидві сторони від якої функція монотонно зростає, то така функція називається унімодальною (рис. 3.1, б). Унімодальні функції можуть бути не лише неперервними, але й дискретними, мати розриви. Проте для них також повинна бути справедливою умова $P(x^*) \leq P(x)$ для всіх x . Оптимізаційні моделі класифікують відповідно до вигляду функцій та розмірності вектору X , тобто числом N змінних. Одномірна оптимізація без обмежень характеризується наявністю однієї змінної і відсутністю обмежень і $x_i^H = x_i^B$, тобто

$$\text{при } N = 1, J = K = 0, x^B = -x^H = \infty.$$

Задачі цього класу інакше називають безумовною оптимізацією, бо в них відсутні додаткові умови.

У випадках коли $P(x)$ є функцією декількох аргументів (тобто $N > 1$), а всі інші умови відповідають задачі типу (3.5), то має місце багатомірна задана безумовної оптимізації.

Задачі умовної оптимізації, в яких функції i є лінійними, відносяться до класу задач з лінійними обмеженнями. В них цільова функція може бути нелінійною і тоді їх називають задачами нелінійного програмування.

Якщо ж і цільова функція, і обмеження лінійні, то такі задачі відносяться до лінійного програмування. При додатковій умові, що всі або окремі змінні

вектора X повинні бути цілими числами, задачі відносяться до цілочисельного програмування.

Наведена вище класифікація оптимізаційних задач має не лише методологічне, але й практичне значення, бо передбачає використання специфічних методів їх вирішення.

Постановку оптимізаційних задач рекомендується здійснювати в такій послідовності.

Спочатку необхідно визначити границі системи, що оптимізується. Від цього суттєво залежать зміст і складність задачі. Наприклад, при обґрунтуванні складу збирально-транспортного комплексу можна оптимізувати розмір збиральних ланок, а всі інші ланки розрахунковими методами узгодити з основними. Такий вибір границь системи дозволяє вирішувати простішу оптимізаційну задачу, ніж при оптимізації всього ЗТК.

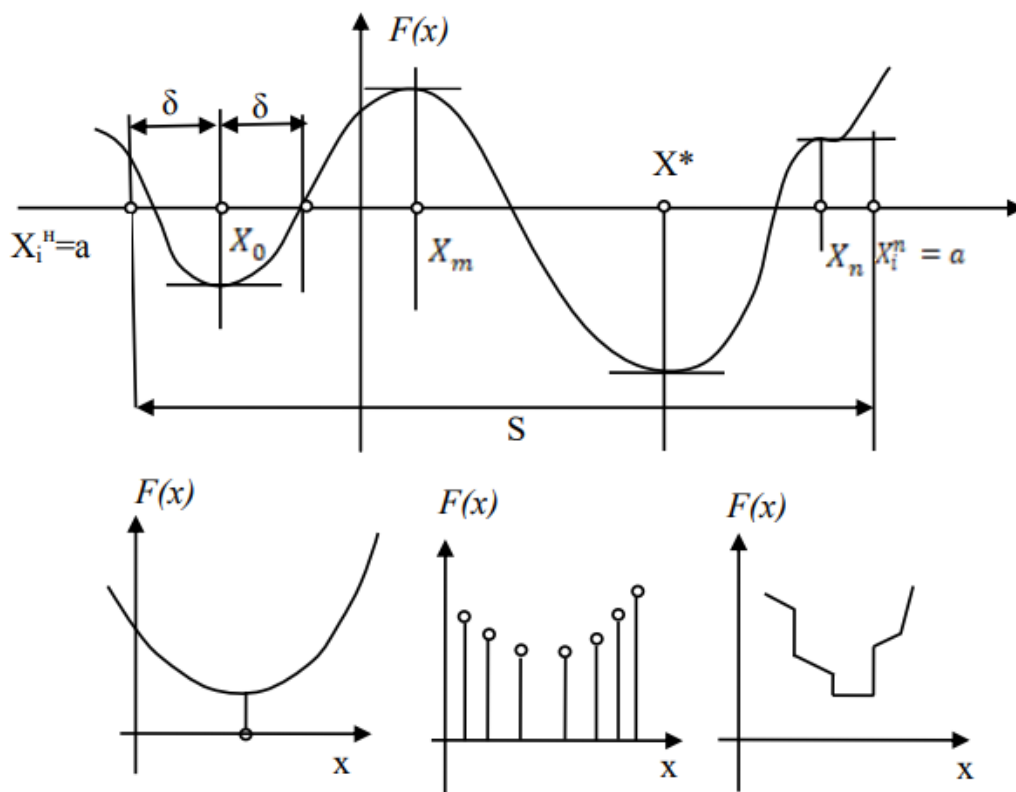


Рисунок 8.1 – Приклади функцій однієї змінної: а – неперервна функція з локальним () і глобальним (X^*) мінімумом у допустимій області S ; б – неперервна унімодальна функція; в – дискретна унімодальна функція; г – унімодальна функція з розривами.

Наступним кроком буде обґрунтування критерію оптимальності, який однозначно і з достатньою повнотою характеризував би мету оптимізації. Призначення критерію є одним з найбільш відповідальних етапів. Наприклад, при оптимізації потреби у збиральній техніці критерієм може бути сума затрат на придбання та експлуатацію техніки (S) і втрат (B) від недобору врожаю внаслідок збільшення строків збирання при недостатній кількості технічних засобів. У порівнянні з окремими складовими S і B їх сума ($S + B$) є більш представницькою у відношенні до мети і в певних границях має оптимум (рис. 8.2). Наприклад, при оптимізації потреби у збиральній техніці критерієм може бути сума затрат на придбання та експлуатацію техніки (S) і втрат (B) від недобору врожаю внаслідок збільшення строків збирання при недостатній кількості технічних засобів. У порівнянні з окремими складовими S і B їх сума є більш представницькою у відношенні до мети і в певних границях має оптимум (рис. 8.2). Далі обґрунтовують набір незалежних змінних, які суттєво впливають на величину критерію оптимальності, а також обмеження. Від повноти включення незалежних змінних (факторів) у математичну модель задачі значною мірою залежить адекватність моделі реальній системі. З іншого боку, важливо не збільшувати розмірності задачі за рахунок надлишкової деталізації моделі, включення факторів, що незначно впливають на цільову функцію.

Математична модель задачі описує взаємозв'язки між факторами і відображає їх вплив на цільову функцію. Ці взаємозв'язки виражаються рівняннями, що описують фізичні процеси функціонування системи, а також сукупністю обмежень у вигляді рівнянь та нерівностей, які визначають область допустимих значень факторів, задають величину ресурсів і додаткові вимоги. Крім числа факторів, що включені в модель, на її адекватність впливає також аналітичний вираз рівнянь зв'язку. Так, спрощення моделі за рахунок виразу суттєво нелінійних зв'язків лінійними залежностями може призвести до неадекватності моделі.

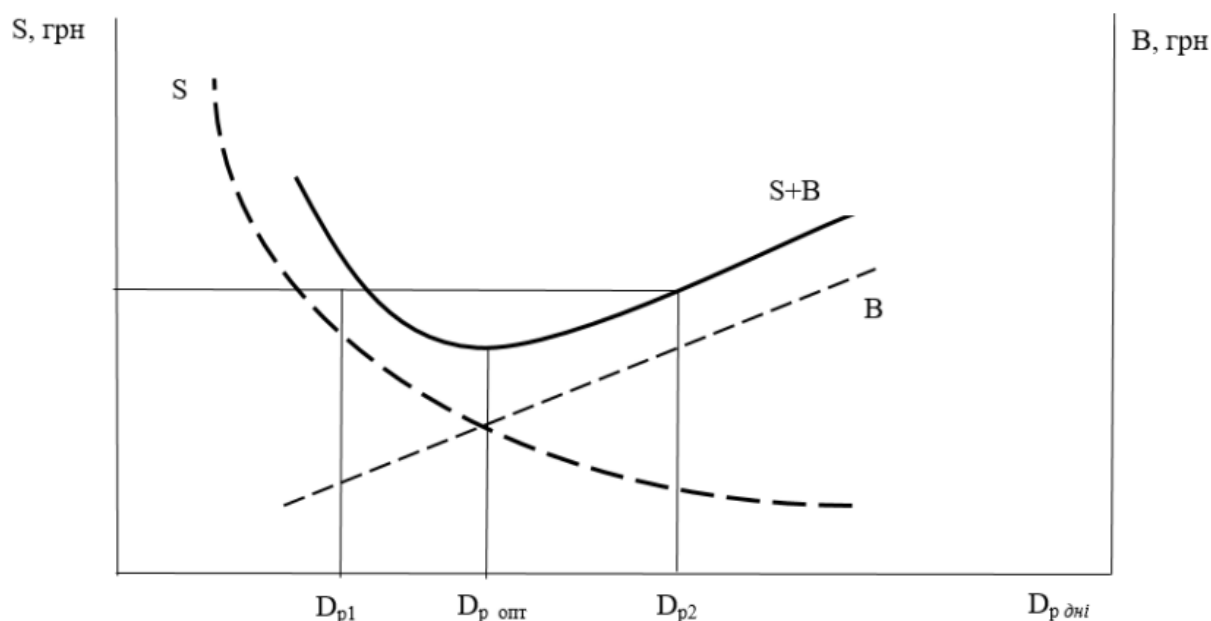


Рисунок 8.2 – Залежність затрат на придбання і утримання техніки (S) і втрат врожаю(B) від тривалості збирання

Таким чином, побудова математичної моделі вимагає розуміння суті процесів, що протікають у системі, а також вимог щодо точності кінцевих результатів оптимізації. Після того, як визначені границі системи, обґрунтований критерій та цільова функція, побудована математична модель, постає питання вибору методу оптимізації. Значною мірою цей вибір залежить від класу задачі, тобто конкретного виразу загальної моделі, що описується функціями. Найпоширеніші в інженерній практиці методи оптимізації розглянемо детальніше пізніше. Одновимірна оптимізація без обмежень

Задача оптимізації, в якій величина критерію залежить від одного фактору, при відсутності обмежень відноситься до класу одновимірної безумовної оптимізації. Це найпростіші і водночас досить поширені в оптимізації інженерних рішень задачі. Переходячи до методів одновимірної оптимізації, нагадаємо правила знаходження максимуму і мінімуму за допомогою похідних від функцій, що диференціюються (див. рис. 8.1 а і табл. 8.2). У точках мінімуму і максимуму відбувається зміна знаку першої похідної $'(x)$, в

той час як у точці перегину функції 120 знак похідної не змінюється. Отже, за допомогою похідних функції, що диференціюється, ми можемо виявити точки екстремумів. Якщо функція $f(x)$ унімодальна, то цього достатньо для вирішення оптимізаційної задачі. Якщо ж функція має декілька мінімумів або максимумів, то для визначення локального чи глобального мінімуму необхідно порівняти значення функцій у відповідних точках, тобто порівняти $f(x)$ у наведеному прикладі (див. рис. 8.1 а).

Таблиця 8.2 - Характерні значення функції

Значення похідних функції	Точка	Значення функції
Перша похідна $f'(x)=0$	x_0 x_m x^* x_n	Локальний мінімум Локальний максимум Глобальний мінімум Перегин функції
$f'(x)=0$, друга похідна $f''(x)<0$ $f'(x)=0$, $f''(x) > 0$	x_m x_0 x^*	Локальний максимум Локальний мінімум Глобальний мінімум

Метод знаходження оптимуму з використанням похідних обмежується умовою диференційованості функції. Крім того, можливі випадки, коли функція $f(x)$ включає члени з високими показниками ступеня (вище трьох) і аналітичний розв'язок рівняння $f'(x)=0$ може бути ускладненим. В таких випадках використовуються наближені методи послідовного пошуку оптимуму, які спираються на числові методи розв'язку. При застосуванні числових методів послідовного виключення інтервалів точка мінімуму (максимуму) знаходиться шляхом визначення і порівняння значень функцій $f(x)$ заданому інтервалі $[a; b]$, послідовного звуження інтервалу пошуку до знаходження оптимуму із заданою точністю або із заданим числом ітерацій. Найбільш ефективним з точки зору простоти реалізації та процедури обчислень є пошук оптимуму методом «золотого перетину». Його суть розглянемо на графічному прикладі (рис. 8. 3). Попередньо встановлюється початковий інтервал $[a; b]$, в якому передбачається наявність мінімуму. Умовою застосування методу «золотого перетину» є унімодальність функції на заданому інтервалі. Далі визначають значення $f(x)$ точках та тобто

початковий інтервал буде рівним . Інтервал $[a; b]$ поділяють на два відрізки в пропорції золотого перетину, при якій відношення цілого відрізка до його більшої частини дорівнює відношенню більшої частини до меншої, тобто

$$\frac{L_0}{L_{01}} = \frac{L_{01}}{L_{11}},$$

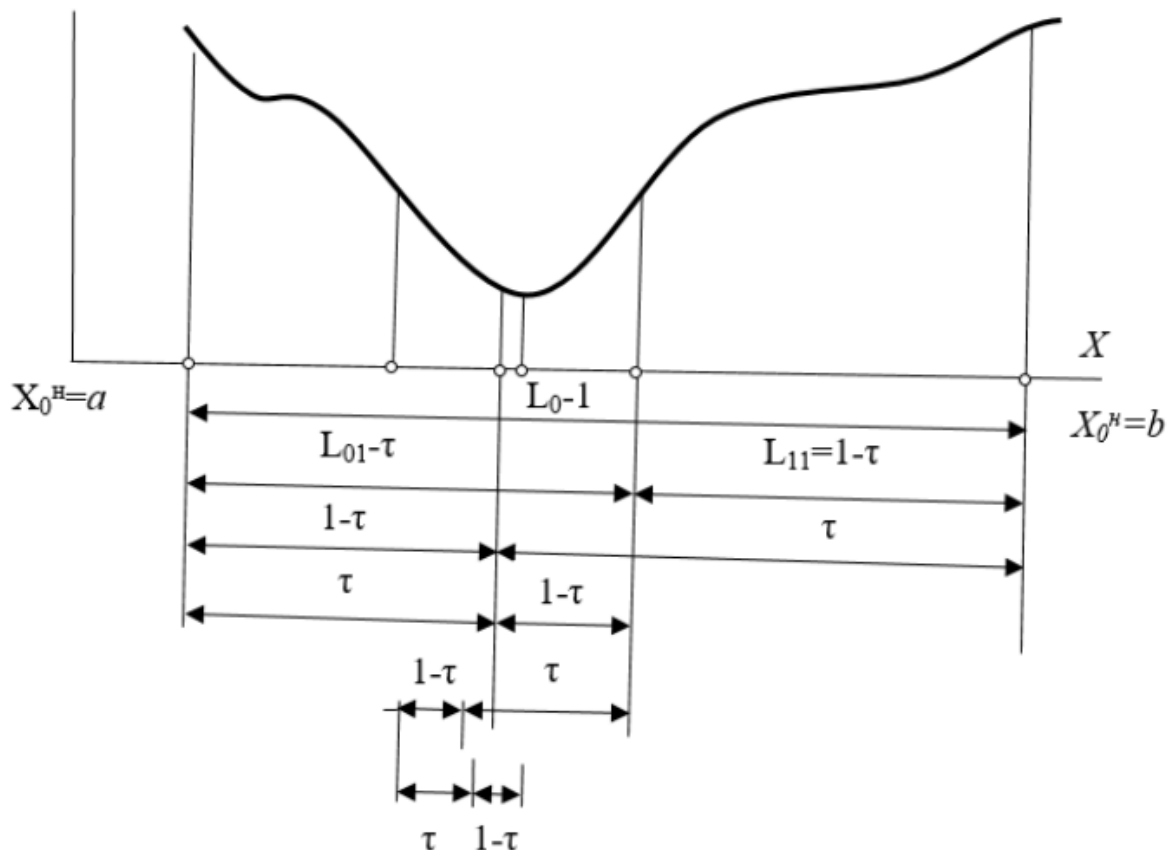


Рисунок 8.3 – Схема ітерацій при оптимізації методом «золотого перетину»

Прийнявши початковий інтервал $[a, b]$, а $f(x)$, можемо записати: $f(x)$; Додатнім коренем цього квадратного рівняння буде: x_1 . Отже, визначивши значення $f(x_1)$ та $f(x_2)$, розраховують для них відповідні значення функції f та і порівнюють їх з метою скорочення інтервалу пошуку: якщо $f(x_1) < f(x_2)$, то приймають новий інтервал коли $f(x_1) > f(x_2)$, приймають $[a, x_2]$. Детерміновані методи і моделі в обґрунтуванні інженерних рішень є найпоширенішими. Основна їх особливість – однозначність вихідних даних і відповіді при вирішенні виробничих задач. Фахівцям інженерної

служби важливо сформувати набір розрахункових моделей для вирішення типових задач, їх інформаційне, програмне та інструментальне забезпечення. Наявність обчислювальної техніки значно полегшує розрахунки і знижує затрати часу на їх проведення в десятки разів. Це дозволяє підвищити якість розробки інженерної документації, обґрунтованість рішень, що приймаються.

122 При необхідності проведення багаторазових розрахунків значні переваги має застосування номограм. Аналітичні та графоаналітичні методи взаємно доповнюють одні одних. Прийняття рішення за допомогою номограм не вимагає спеціальної підготовки. Вони можуть використовуватись у польових умовах, механізаторами і обслуговуючим персоналом. Потрібно лише розробити набір номограм до найбільш уживаних задач і оформити їх у вигляді, зручному для використання. В обґрунтуванні рішень також повинні зайняти значне місце оптимізаційні моделі. В умовах дії економічних механізмів господарювання роль оптимізаційних методів зростає. Вважається, що їх частка у вирішенні інженерно-економічних задач повинна становити не менше 25 %. У даному розділі розкриті лише найбільш уживані в аграрній інженерії методи і моделі. Зокрема, це розрахункові моделі, лінійне програмування, графоаналітичні методи.

ЛЕКЦІЯ 9. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ МОДЕЛЮВАННЯ. ВЛАСТИВОСТІ МОДЕЛІ

Мета– сформуванати у студента цілісне уявлення про моделювання технологічних, зокрема, електротехнічних об'єктів і комплексів.

Зокрема:

-фізичне моделювання

-математичне моделювання

-спеціальні методи моделювання

-комп'ютерне моделювання

Моделювання – заміщення одного об'єкта іншим з метою отримання інформації про найважливіші властивості об'єкта-оригіналу за допомогою об'єкта-моделі. Моделювання – метод пізнання навколишнього світу, який можна віднести до загальнонаукових методів, застосовуваним як на емпіричному, так і на теоретичному рівні пізнання.

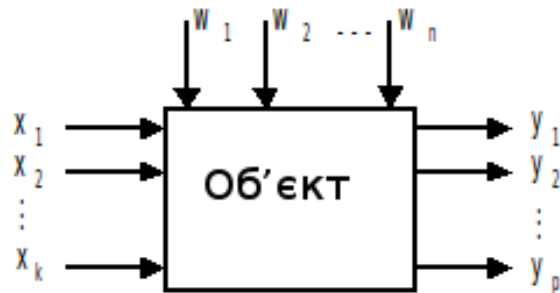
Таким чином, базовим визначенням можна вважати таке: **моделювання – це побудова (або вибір з вже існуючих) моделі, її вивчення і використання з метою отримання нових знань про досліджуваний об'єкт.**

Модель – це об'єкт-замінник об'єкта-оригіналу, що забезпечує вивчення деяких властивостей оригіналу. Аналіз досвіду використання моделей у природничих і технічних науках дозволяє зробити висновок, що модель – це наше уявлення про досліджуваний об'єкт, своєрідна форма кодування інформації про об'єкт.

Модель – відтворення чи відображення об'єкту, задуму (конструкцій), опису чи розрахунків, що відображає, імітує, відтворює принципи внутрішньої організації або функціонування, певні властивості, ознаки чи(та) характеристики об'єкта дослідження чи відтворення (оригіналу).

Моделі і методи моделювання використовуються при створенні систем автоматизованого проектування, систем прийняття рішень, систем автоматизованого керування, систем штучного інтелекту. Потрібність у

розв'язанні задач моделювання систем виникає не тільки у науковця, але й у проектувальника, виробника, ділової людини під час повсякденної праці.



Існує товариство міжнародного комп'ютерного моделювання SCS (www.scs.org), що опікується вивченням, розповсюдженням, використанням й удосконаленням методів моделювання для цілей вирішення практичних проблем. Європейське товариство моделювання EUROSIM розміщує свою інформацію на порталі www.eurosim.info. В Україні інформація з моделювання систем розповсюджується з порталу www.simulation.org.ua.

Різновиди моделей, способів і методів моделювання

Розрізняють такі основні різновиди моделей, які використовуються при дослідженні процесів збагачення корисних копалин:

- *описова модель* полягає в будь-якому техніко-технологічному опису об'єкта моделювання;

Приклад – опис *факторної моделі* технологічного процесу – схеми («чорного ящика»), яка показує всі фактори (чинники), що впливають на процес, вихідні параметри та зв'язок між вхідними та вихідними характеристиками потоків речовини та енергії.

Інший приклад опис – *феноменологічної моделі* – схеми, яка відображає послідовність та взаємозв'язок всіх елементарних фізичних та хімічних процесів (субпроцесів), які мають місце при проведенні технологічного процесу (наприклад, феноменологічна модель процесу флотації, флокуляції

тощо). Вихідні величини кожного попереднього субпроцесу є вхідними для наступного. Вихідні величини останнього субпроцесу є вихідними величинами технологічного процесу в цілому.

- *евристична модель* полягає в формалізації моделей процесів, що сформувалися у людини, яка веде технологічний процес, в результаті численних особистих проб і спостережень;

- *графічна модель* представляє об'єкт моделювання у вигляді рисунків, креслень, графів, схем; Наприклад, *феноменологічна модель*, *факторна модель*, *граф* тощо;

- *фізична модель* являє собою змінений у визначеному масштабі (зменшення або збільшення) об'єкт моделювання;

- *математична модель* – опис об'єкта моделювання однією (*одноструктурна модель*) або декількома (*складноструктурна модель*) математичною залежністю; розрізняють *аналітичні*, *емпіричні* та змішані математичні моделі;

- *аналогова модель* використовує заміну об'єкта моделювання іншим, який відрізняється за своєю фізичною природою, але вони можуть бути описані одним й тим же диференціальним рівнянням;

- *імітаційна модель* – представлення об'єкта моделювання у вигляді рекурентних співвідношень і наступна імітація роботи об'єкта на комп'ютері.

Математична модель – система математичних співвідношень, які описують досліджуваний процес або явище.

У техніці найчастіше застосовуються два способи математичного моделювання:

- аналітичний, що передбачає можливість точного математичного опису строго детермінованих систем,
- ймовірнісний, що дозволяє отримати не однозначне рішення, а його ймовірнісну характеристику (напр., параметрів шахти або яких-небудь параметрів технологічного процесу).

Математичне моделювання фізичних задач з використанням мобільних пристроїв

Для створення математичних моделей використовують різні математичні засоби — мову диференціальних або інтегральних рівнянь, теорії множин, абстрактної алгебри, математичну логіку, теорії ймовірностей, графи та інші.

Для будь якого об'єкта можна скласти велику кількість моделей, які будуть відрізнятися одна від іншої перш за все остаточною погрешністю (остаточною дисперсією), тобто будуть відтворювати реальний об'єкт з певною точністю.

Моделі бувають статичні $y = f(x)$ і динамічні $y = f(x, t)$, де y — будь який вихідний показник процесу; x — фактор, що діє на вході процесу; t — поточний час.

Статичні моделі бувають:

– лінійні

$$y = a_0 + a_1x;$$

$$y = a_1\Delta x,$$

– нелінійні за фактором x

$$y = a_0 + a_1x + a_{11}x^2,$$

– нелінійні за параметром, напр., b

$$y = ae^{-bx}.$$

Частіше за все отримують багатомірні моделі, тобто y є функцією декількох факторів

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Моделювання — заміщення одного об'єкта іншим з метою отримання інформації про найважливіші властивості об'єкта-оригіналу за допомогою об'єкта-моделі. Моделювання — метод пізнання навколишнього світу, який

можна віднести до загальнонаукових методів, застосовних як на емпіричному, так і на теоретичному рівні пізнання.

Отже, моделювання – це [метод](#) дослідження об'єктів пізнання (явищ, пристроїв, процесів, їх комплексів), що ґрунтується на заміні конкретного об'єкта досліджень (оригіналу) іншим, подібним до нього ([моделлю](#)).

Базовим визначенням можна вважати таке: **моделювання – це побудова (або вибір з вже існуючих) моделі, її вивчення і використання з метою отримання нових знань про досліджуваний об'єкт.**

Алгоритм моделювання включає спочатку побудову особливої ідеальної конструкції, *змістовної моделі* (інші автори називають цей ідеальний об'єкт *концептуальна модель, уможлядна модель або передмодель*). При цьому фінальна математична конструкція називається *формальною моделлю* або просто математичною моделлю, отриманою в результаті формалізації даної змістовної моделі (передмоделі). Побудова змістовної моделі може проводитися за допомогою набору готових ідеалізацій, як у механіці, де ідеальні пружини, тверді тіла, ідеальні маятники, пружні середовища і т.п. дають готові структурні елементи для змістовного моделювання. У збагаченні корисних копалин змістовною перед моделлю може виступати згадана вище факторна і (або) феноменологічна модель технологічного процесу.

Теорія і практика моделювання оперує рядом понять: *об'єкт, процес, система, апіорна інформація, дослід, експеримент, фактор, область експериментування, цільова функція, похибка дослідів, обмеження та ін.*

Об'єкт (від лат. *objectum* – предмет) – все, на що спрямована діяльність людини. Будь-який об'єкт дослідження є нескінченно складним і характеризується нескінченним числом станів і параметрів.

Процес – послідовна зміна станів об'єкту в часі, а також певна сукупність ряду послідовних дій, спрямованих на досягнення певного результату.

Система – множина взаємопов'язаних елементів, відокремлена від середовища і яка взаємодіє з ним, як ціле. Система має конкретну структуру і

цілком конкретне цільове призначення. Підсистемою називають складову частину системи, у якій можна виокремити інші складові.

Елементом системи називають найпростішу складову частину системи, яку умовно розглядають як неподільну.

Зв'язком називають співвідношення між компонентами системи, ґрунтовані на взаємозалежності і взаємообумовленості.

Зовнішнє середовище – множина існуючих поза системою (об'єктом) елементів будь-якої природи, що впливають на систему (об'єкт) або знаходяться під її (його) впливом.

Гіпотеза – наукове припущення, що висувається для пояснення будь-якого явища і потребує перевірки на досліді та теоретичного обґрунтування, для того щоб стати достовірною науковою теорією.

Аналогія – подібність, схожість у цілому відмінних предметів, явищ за певними властивостями, ознаками або відношеннями.

Адекватність моделі – збіг властивостей (функцій / параметрів / характеристик і т. п) моделі і відповідних властивостей модельованого об'єкта.

Коефіцієнт детермінації (позначається як R^2 — *R-квадрат*) — статистичний показник, що використовується в статистичних моделях як міра залежності варіації залежної змінної від варіації незалежних змінних. Іншими словами, чисельно показує, яка частина варіації залежної змінної пояснена моделлю. Вказує, наскільки отримані спостереження підтверджують модель.

В умовах класичної лінійної множинної регресії, коефіцієнт приймає значення від 0 до 1. Вважається, що чим ближче коефіцієнт до 1, тим кращою є модель.

Дослідом називають однократне виконання усіх необхідних операцій для отримання одного експериментального результату. В результаті дослідів отримують одне число або сукупність чисел, які характеризують декілька різнорідних даних [2, 3]. Дослід по суті – здійснення визначеного діяння на об'єкт і реєстрування одержаного результату. Дослід – це відтворення якого-

небудь явища або спостереження за новим явищем у певних умовах з метою вивчення, дослідження.

Експериментом називають сукупність дослідів, об'єднаних однією системою їх постановки, взаємозв'язком результатів і способом їх обробки. В результаті експерименту отримують сукупність результатів, які допускають їхню сумісну обробку і зіставлення.

Фактором (чинником) називають умови, рушійну силу будь-якого процесу, явища. У нашому випадку фактор – незалежна змінна, яка може приймати в деякому інтервалі часу визначені значення. Звичайно, у процесах збагачення корисних копалин змінюють деякі конкретні величини, напр., масу навіски, витрати води і реагентів, тривалість дослідів. Фактор звичайно позначають літерою *x*. Фактор повинний задовольняти визначеним вимогам:

- *первинність*, тобто як фактор доцільніше приймати таку величину, яка залежить тільки від експериментатора і не є функцією декількох, у тому числі невідомих, величин. Вторинні фактори звичайно із достовірністю можна встановити на початку дослідів, що й слід враховувати при інтерпретації результатів;

- *можливість управління* пов'язана з первинністю і полягає у тому, що фактор повинен встановлюватись на необхідному рівні, інакше план експерименту не буде реалізований у деякому досліді, в результаті чого робота не буде виконана або потребуватиме серйозного коректування;

- *операційність і вимірність* – це вимоги до однозначності (однотиповості) встановлення одного й того ж фактора на одному і тому ж рівні, а також до вказівок щодо послідовності операцій по максимально точному встановленню і контролю значення фактора.

- *незалежність* полягає у тому, що при плануванні експериментів звичайно передбачається вивчення впливу різних комбінацій факторів, кожна з яких повинна бути реалізована;

– *безпека експерименту* вимагає передбачити і виключити до початку дослідів такі комбінації факторів, які можуть привести до вибуху, виділенню токсичних компонентів, аварії на експериментальному пристрої.

Область експериментування – це сукупність запланованих значень факторів, яка охоплює деяку область гіперпростору. Усі результати і висновки на їх основі з відомою точністю належать саме до цієї області гіперпростору факторів. Інтерполяція значень і висновків усередині області експериментування є допустимою. Екстраполяція результатів і висновків за межами області експериментування можлива, але гарантувати визначену точність при цьому не можна.

Цільова функція – функція, що зв'язує мету (змінну, що оптимізується y) з керованими змінними. Цільова функція може містити:

– *безпосередньо виміряні величини*, напр., витрати рідини γ :

$$\gamma \rightarrow \gamma_{\max};$$

– *деякий обчислювальний показник*, який об'єднує декілька вихідних, безпосередньо вимірюваних показників досліду, напр., ККД електричної машини https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/feeem/4lagutin_vyprobuv_elektrmashin_transformatoriv/p9.htm :

Коефіцієнт корисної дії (*efficiency*) (ККД) електричної машини визначається відношенням корисної потужності до підведеної та виражається у відсотках:

$$\eta = 100 \cdot P_2 / P_1; \quad \eta = 100 \cdot (P_1 - \Sigma P) / P_1$$

де P_1 – потужність, яка підводиться до електричної мережі;

P_2 – корисна потужність (*operating power; useful power*) електричної машини;

$\Sigma P = P_1 - P_2$ – сумарні втрати в електричній машині.

Важливою особливістю цільової функції є неможливість забезпечення в рамках одного процесу, при одному і тому ж наборі факторів управління, максимального (мінімального) значення двох і більше показників.

Формулюючи оптимізуючий показник слід виділити і додати до нього **усі** необхідні обмеження і отримати тим самим доцільну цільову функцію.

Обмеження – це будь які умови, які накладаються на можливість зміни факторів, вихідних показників, вхідних збуджуючих впливів, ресурсів і часу. Обмеження бувають принципові (умови фізичного здійснення), технічні, екологічні, економічні та умови техніки безпеки.

Регресія – форма зв'язку між випадковими величинами. Закон зміни математичного очікування однієї випадкової величини залежно від значень іншої. Розрізняють прямолінійну, криволінійну, ортогональну, параболічну та ін. регресії, а також лінію і площину регресії.

Локальний екстремум – екстремум в деякому довільно малому околі (області) гіперпростору.

Глобальний екстремум – екстремум в усій розглядуваній області гіперпростору. Передбачається, що глобальний екстремум один, а локальних екстремумів може бути багато.

Задача оптимізації — задача знаходження точки (точок) екстремуму, або декількох екстремумів заданої функції.

Апріорна інформація – це інформація, якою володіє дослідник до початку експерименту. Апріорна інформація дозволяє: сформулювати цільову функцію; вибрати номенклатуру факторів, центр експерименту (номінальні або початкові значення факторів), інтервали варіювання; методично правильно виконати збір інформації.

Точкові оцінки – числа, які використовують для характеристики результатів дослідів. При цьому використовують не тільки безпосередньо виміряні дані, але й при необхідності деякі розраховують. Найважливіші з них:

– *середнє арифметичне*, або середнє, яке позначається рисою над літерою:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n,$$

де y_i – результат, отриманий в i -тому досліді; n – число дослідів; $\bar{y}$ – середнє арифметичне результатів n дослідів;

– середнє квадратичне відхилення

$$S_y = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2] / (n-1)};$$

– дисперсія – квадрат середнього квадратичного відхилення

$$S_y^2 = [\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2] / (n-1).$$

Похибка дослідів – це відхилення у результатах, які породжені усілякими відхиленнями умов дослідів від заданих.

Випадкова похибка – складова загальної похибки вимірювання, яка змінюється випадковим чином (як за знаком, так і за величиною) під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини. Випадкові похибки з'являються внаслідок невеликих, але численних відхилень при виконанні дослідів (їх причини – конструктивні та технологічні недосконалості вузлів та деталей приладів; випадкові коливання зовнішніх впливів — температури, вологості повітря, атмосферного тиску, напруженості зовнішніх електричних та магнітних полів тощо; нестабільність живлення електронних приладів; суб'єктивні помилки оператора; вібрації; теплові шуми в електронних приладах; просторова неоднорідність та часова нестабільність об'єкта вимірювання). Ці похибки обчислюють за формулою: $e = \Delta - M(\Delta)$, де Δ — похибка вимірювання, $M(\Delta)$ — математичне сподівання похибки.

Систематична похибка – складова загальної похибки вимірювання, яка залишається постійною або закономірно змінюється під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини. Причинами виникнення систематичних похибок є: відхилення параметрів реальних засобів вимірювань від

розрахункових значень, передбачених схемою; неврівноваженість деяких деталей засобів вимірювань відносно їх осі обертання; пружна деформація деталей засобів вимірювань, які мають малу жорсткість, що призводить до додаткових переміщень; похибки градуювання чи невеликий зсув шкали приладу; неточність мір фізичних величин; старіння матеріалів, із яких виготовлені засоби вимірювань; відхилення значень впливних величин (температури, вологості повітря, напруженості зовнішніх електричних та магнітних полів тощо) під час вимірювання від їх значень під час градуювання засобів вимірювання. Виявити наявність систематичної похибки можна тільки порівнянням результату дослід з еталонним, тобто результатом, який не містить систематичної похибки. Більшість систематичних похибок може бути виявлена та оцінена шляхом теоретичного аналізу властивостей об'єкта, умов вимірювання, особливостей методу, характеристик застосовуваних засобів вимірювань тощо. Після встановлення наявності систематичної похибки визначають причину її виникнення і усувають цю причину. Якщо причину встановити або усунути не можна, вводять поправки, що враховують вплив цієї систематичної похибки, яку не можна усунути.

Число ступенів свободи f – кількість незалежних значень результатів дослідів, які використовуються для обчислення коефіцієнтів моделі, похибки відтворення, остаточної дисперсії і т.п. Чисельно f дорівнює різниці між кількістю даних, що є, і обчисленими за цими даними показниками.

Похибка відтворення – це випадкова похибка, яка звичайно обчислюється у вигляді середнього квадратичного відхилення від середнього паралельних дослідів

$$S_{By} = \sqrt{[\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2] / (k - 1)},$$

де k – число паралельних дослідів; $\bar{y}$ – середнє значення результатів k паралельних дослідів (дослідів виконаних при одних і тих же значеннях

факторів); y_i – результат i -того дослід; S_{By_i} – похибка відтворення результатів будь якого окремого дослід.

Похибка відтворення S_{By} середнього значення результату k дослідів буде менше і визначається за формулою

$$S_{By} = S_{By_i} / \sqrt{k}.$$

Ця властивість зниження похибки широко використовується для підвищення точності результатів експерименту.

Звичайно припускають, що похибка відтворення є результатом деякої неточності виконання усіх операцій дослід, у зв'язку з чим вона повинна бути розподілена за нормальним законом. Відповідно до нормального закону вважають, що в межах $\pm S_{By}$ міститься 68 % похибки усіх дослідів; в межах $\pm 2S_{By}$ – 95,5 % і в межах $\pm 3S_{By}$ – 99,7 % усіх похибок. При обмеженій кількості дослідів використовують розподіл Ст'юдента, що враховує можливі похибки у визначенні S_{By_i} при малому числі даних. Таким чином, якщо задана довірна імовірність p (%) і відоме число ступенів свободи обчисленої похибки відтворення (звичайно $f_B = k - 1$), можна знайти довірчі інтервали для похибки результатів.

Довірчі інтервали похибки результатів – це діапазон значень, в якому з прийнятою довірчою імовірністю може знаходитися конкретне значення похибки окремого дослід (або інших характеристик дослідів, напр., середніх результатів паралельних дослідів),

$$\pm \Delta y_i = \pm t S_{By_i},$$

де $\pm \Delta y_i$ – граничні значення похибок (максимальні позитивні і негативні) або довірчий інтервал; t – критерій Ст'юдента.

Із збільшенням довірчої імовірності довірчий інтервал розширюється, тобто при більшій довірчій імовірності гарантувати появу дослідних результатів можна тільки в більш широкому діапазоні.

Прوماхи – це випадкові похибки, які перевищують довірчі інтервали. Прوماхи виникають внаслідок грубого порушення умов дослідів або особливо несприятливими обставинами. Як правило, їх відкидають, а дослід, якщо це можливо повторюють.

Прوماхи можуть бути як у гірший, так і у кращий бік, тому при появі дуже гарного результату, який розглядається як промах, необхідно проаналізувати умови його появи. В такому випадку промах може дати цінну інформацію для покращення результатів роботи.

Для виключення промахів з великої вибірки можна користуватися правилом 2σ або 3σ . Для промаху x^* розраховується абсолютне значення різниці $|x^* - \bar{x}|$. При довірчій імовірності $P = 0,95$ x^* відкидається, якщо $|x^* - \bar{x}| > 2\sigma$, а при $P = 0,997$, якщо $|x^* - \bar{x}| > 3\sigma$.

Тут – середнє квадратичне відхилення. $\sigma = S_y$

Похибка зведеного показника виконується при необхідності визначення похибки відтворюваності будь якого обчисленого (зведеного) показника вигляду $z = f(y, x)$ з використанням формули:

$$S_{Bz}^2 = (\partial z / \partial y)_0^2 S_{By}^2 + (\partial z / \partial x)_0^2 S_{Bx}^2.$$

Вважають, що похибки S_{By}^2 і S_{Bx}^2 не залежать одна від одної. Нульові індекси при похідних означають, що конкретні чисельні значення похідних знаходяться при деяких номінальних значеннях x_0 і y_0 .

Для похибок відтворюваності, що спричиняються випадково, звичайно припускається, що коефіцієнт кореляції дорівнює нулю. Якщо необхідно розглянути відхилення показника z , які спричиняються відхиленнями його складових факторів x і y , то слід використовувати формулу:

$$S_z^2 = (\partial z / \partial y)_0^2 S_y^2 + (\partial z / \partial x)_0^2 S_x^2 + 2(\partial z / \partial y)_0 (\partial z / \partial x)_0 S_y S_x r_{x/y},$$

де $r_{x/y}$ – коефіцієнт кореляції між x і y .

Встановлення різниці. В результаті обробки даних експерименту робляться висновки, які формально зводяться до відповіді на одне з трьох питань:

- чи значимо відрізняються два (або більше) результатів?
- чи значимо відрізняються дві (або більше) похибки відтворюваності однорідних результатів?

- чи значимо відрізняються кількості спостережених величин?

Відповіді на ці питання отримують в результаті наступних дій:

- визначають розрахункове значення спеціального критерію K_p ;
- задаються довірчою імовірністю p висновку;
- знаходять у відповідних таблицях значення критерію K_T при заданій p і знайдених ступенях свободи f ;
- порівнюють K_p і K_T ;
- якщо $K_p > K_T$ стверджують, що існуюча різниця між результатами не випадкова, тобто значима.

Для підтвердження значимості різниці звичайно задаються високою довірчою імовірністю більше 90 % (звичайно $p = 95 \%$). Якщо з прийнятою імовірністю p різниці не встановлено, стверджувати що її взагалі не існує не можна, тобто зворотний висновок невірний. Якщо необхідно встановити ідентичність (відсутність різниці) показників, задаються довірчою імовірністю менше 10 % (звичайно $p = 5 \%$).

ЛЕКЦІЯ 10. ВИДИ МОДЕЛЮВАННЯ

Математичне моделювання технічних систем

Модель та математичне моделювання.

Види моделей Математичне моделювання – це засіб аналізу роботи системи, за якого аналізується не сам об'єкт, а його модель. Це один з основних інструментів аналізу нині. Під інструментом розуміють не лише конкретне використання і технічні засоби реалізації, але й сам методологічний підхід, немовби погляд на явища та процеси, на їх внутрішню структуру, властивості, розвиток з погляду апарату математичного моделювання. Методи математичного моделювання дають якісні і кількісні характеристики. Такий аналіз обумовлений системним підходом до вивчення явищ. Згадаємо, що до головних принципів системного аналізу відносять:

- Динамічність системи;
- Взаємодію;
- Взаємозв'язок;
- Взаємозалежність явищ і елементів у системі;
- Принципи комплексності;
- Принципи цілісності.

Під системою будемо розуміти комплекс взаємопов'язаних елементів. Причому, та сама система може розглядатися як технічна, технологічна, економічна, інформаційна тощо. Як технологічну систему будемо розуміти будь-які технології – технічні, інформаційні, політичні. Процес системного підходу розбивається на такі етапи:

1. Постановка задачі. Визначення цілей та критеріїв задачі.
2. Аналіз досліджуваної системи.
3. Розробка концепції розвитку системи і підготовка можливих варіантів цього розвитку.
4. Аналіз отриманих варіантів рішень та їх наслідків. У дисципліні розглядаються другий та третій етапи. Модель – це форма представлення об'єкта дослідження, яка повторює його основні закономірності роботи,

структурні зв'язки та функції. Математична модель (ММ) об'єкта – його гоморфне відображення у вигляді рівнянь, графіків і т.п. Умовний образ об'єкта, створений для спрощення його дослідження, аналізу та оцінки прийнятих рішень у конкретних або можливих ситуаціях. Моделі бувають ізоморфні (такі, які відображають сам об'єкт у зменшеному форматі, наприклад, макет греблі, будинку тощо) та гоморфні (відображають властивості, а не сам об'єкт).

Варіанти створення моделей: – фізична модель – це дійсна модель системи, виконана у повному масштабі; – математична модель – це вид представлення об'єкта, коли всі його параметри описані математично. – імітаційна модель – це засіб представлення об'єкта дослідження, за якого основні робочі функції замінені роботою інших технічних систем. – аналогова модель – це засіб представлення технічної системи, де він замінюється іншою технологічною системою, дослідження якої поширюється на сам об'єкт. Класифікація моделей систем Зупинімося на деяких поясненнях та визначеннях цієї класифікації Ступінь визначеності – відрізняє моделі за типом даних, що їх описують (визначені наперед, випадкові, невизначені). Область зміни параметрів – визначає, як змінюються параметри системи (з кроком – дискретні, плавно – неперервні, плавно змінюються в межах кроку). Фактор часу – моделі не змінюються за фіксований час – статичні, змінюються у діапазоні часу – динамічні. За засобом опису – поділяються на вперше описані та описані раніше. За походженням – моделі поділяються на моделі, які мають фізичний прояв, і такі, що математично описані. 124 За масштабом часу – моделі, які досліджуються з визначенням стану конкретного часу та з прогнозом поведінки через певний час. Загалом математичні моделі можна класифікувати таким чином: За особливостями об'єкта, що моделюється: • макро- та мікромоделі. За цілями моделювання та інструментарієм, що використаний: • теоретичні та прикладні; • оптимізаційні та рівноважні; • статичні та динамічні; • неперервні та стохастичні. За цільовим призначенням: • теоретично-аналітичні, які використовуються в дослідженні загальних

властивостей закономірностей; • прикладні, для конкретних задач (моделі аналізу, прогнозування, управління). Відповідно до загальної класифікації математичні моделі поділяють на: • функціональні; • структурні; • проміжні форми. У дослідженнях зазвичай використовують структурні моделі, де висвітлено зв'язки підсистем. Функціональні моделі використовують в параметричному регулюванні, коли на поведінку об'єктів впливають шляхом зміни вхідної інформації. За характером відображення причинно-наслідкових зв'язків моделі бувають: • детерміновані (планові моделі); • стохастичні (моделі регресійного аналізу, в яких допускають певну помилку). За засобами відображення чинника часу моделі бувають статистичні та динамічні. У статистичних моделях усі залежності відносяться до одного моменту часу або періоду. Динамічні моделі характеризують зміни технологічних процесів у часі. За тривалістю часу, що розглядаються, моделі бувають: • короткострокові (до року); • середньострокові (до п'яти років); • довгострокові (10-15 років і більше). • прогнозування і планування. За записом функціональної залежності параметрів моделі бувають: • лінійні; • нелінійні. Класифікацію моделей систем зображено на рис. 10..

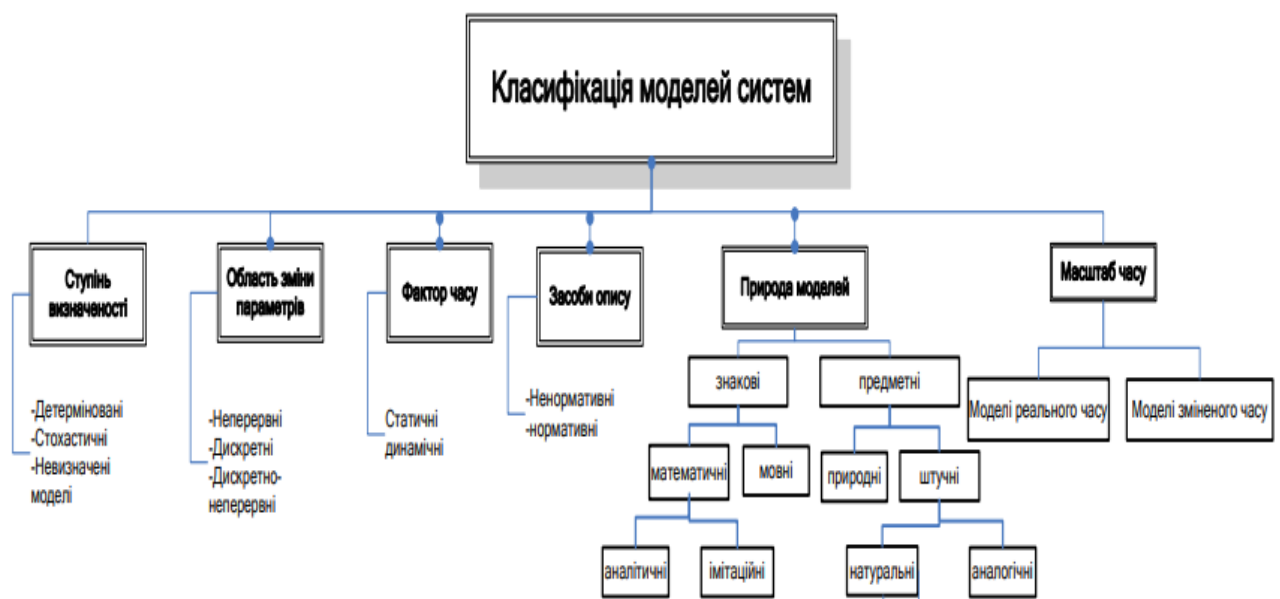


Рисунок 3.4 – Класифікація моделей систем

Етапи побудови математичних моделей

1. Постановка проблеми (економічної, технічної, технологічної тощо) і її якісний аналіз. Вибір та аналіз задачі

2. Побудова математичної моделі Підбір моделі за класичним та простішим призначенням. Причому починають з простої, поступово ускладнюючи її та перевіряючи кожен раз.

3. Математичний аналіз моделі За допомогою різних математичних термінів визначають властивості моделі (математичне очікування, дисперсію).

4. Підготовка вихідної інформації Здійснюється вже не якісна, а кількісна оцінка моделі. Виконують статистичну обробку даних, визначають фактори, які впливають на математичну модель.

5. Чисельне рішення Розробка алгоритмів для чисельного рішення задач, упорядкування програм на ПК, безпосереднє проведення розрахунків. Здійснюється кількісне вирішення задачі. На цьому етапі доцільно використовувати комп'ютерний аналіз за допомогою пакету Excel, Статистика тощо.

6. Аналіз чисельних результатів і їхнє застосування. Якщо модель є адекватною, то проводять аналіз та прогноз. Це завершальний етап. Всі етапи створюють цикл. Якщо шостий етап показав неадекватність математичної моделі, то треба повернутися до першого етапу і почати усе з початку. Закономірності математичного опису моделі системи Закономірності математичного опису моделі системи показано на рис. 10.5. Постановка задач математичного програмування Проблему раціонального ведення господарства або виробництва можна розглядати з позиції методів оптимізації. До задач, пов'язаних з раціональним веденням господарства, належить першою чергою, розподіл загальної суми на різні вироби та ресурси (товари та послуги). У кожному з цих розподілів ресурсів є доход або ресурси, які завжди є обмеженими. Тому задача оптимізації формується як пошук таких значень деяких змінних, що задовольняють обмеженням і за яких досягається максимум чи мінімум цільової функції. Останні умови є критерієм

ефективності виробництва. Математична модель будь-якої оптимізаційної задачі залежить від двох складових:

1. опису технічних та технологічних зв'язків, що впливають із змісту задачі;
2. завдання критерію ефективності її розв'язку. Розв'язок математичної моделі задачі, який забезпечує критерій ефективності, називається оптимальним. Задачі математичного моделювання бувають задачами лінійного та нелінійного програмування.

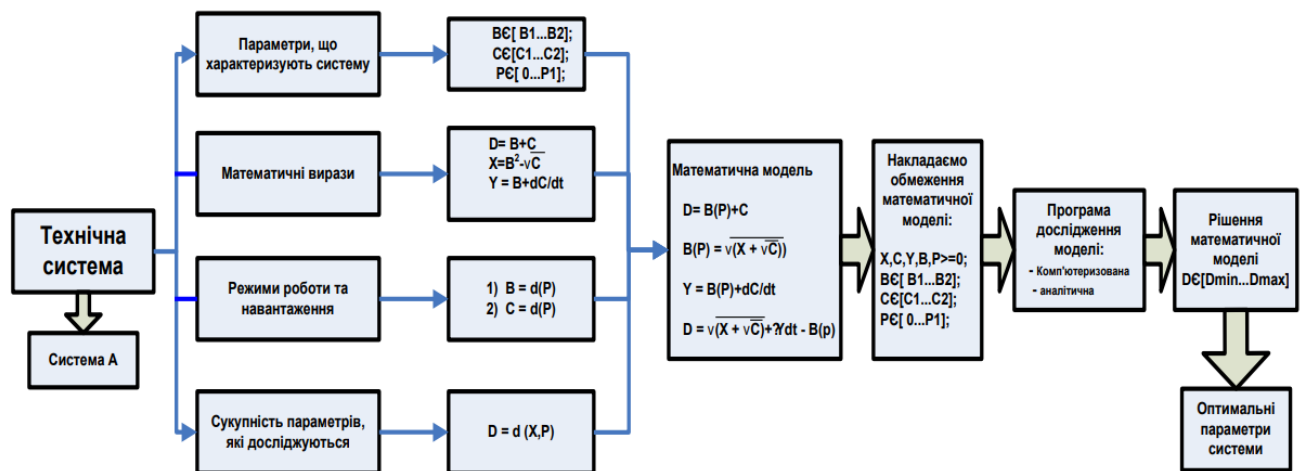


Рисунок 10.5 – Математичний опис моделі системи

ЛЕКЦІЯ 11. ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Мета розділу: розкриття суті і змісту фізичного моделювання технологічних процесів

Фізичне моделювання (англ. *physical simulation*, нім. *physikalische Modellierung*) –

- 1) Створення матеріальної моделі, що має таку саму фізичну природу (такий самий фізичний зміст), як і дійсне явище, що вивчається на основі критеріїв геометричного, кінематичного й динамічного моделювання.
- 2) Відтворення на моделі й дослідження процесів, що якісно однакові з процесами у реальному об'єкті. Під час фізичного моделювання процесу необхідно забезпечити геометричну, часову та фізичну подібності.

Фізичне моделювання — метод експериментального вивчення фізичних явищ, який базується на їх фізичній подібності.

Метод застосовується у випадках, коли:

- відсутня математична модель явища (машини, процесу тощо), або така модель дуже складна, вимагає багато вихідних даних, одержання яких ускладнене.
- відтворення явища (машини, процесу) в реальних масштабах недоцільне.

Метод полягає у створенні лабораторної фізичної моделі явища у зменшеному масштабі і проведення експериментів на цій моделі. Висновки і результати, одержані на моделі розповсюджуються на явище у реальних масштабах.

Метод може дати надійні результати тільки у випадку наявності фізичної подібності реального явища і моделі. Подібність досягається за рахунок рівності для моделі і реального явища значень критеріїв подібності — безрозмірних чисел, що залежать від фізичних (у т.ч. геометричних)

параметрів, що характеризують явище. Експериментальні дані одержані на моделі розповсюджуються на реальний об'єкт з урахуванням критеріїв подібності (на практиці - з врахуванням певних коефіцієнтів).

У широкому сенсі будь-який експеримент є фізичним моделюванням процесу в певних конкретних умовах.

Теорія подібності : загальні поняття

Теорія подібності дає можливість вивчати складні процеси і теоретично, й експериментально. Але, тільки чисте експериментування, без теоретичних узагальнень, не дозволяє розповсюдити висновки, отримані таким шляхом, на інші недосліджені випадки. З іншого боку – тільки теоретичний метод не може охопити усього різноманіття умов фізичного процесу і, крім того, дуже часто приводить до складних математичних рівнянь, які важко розв'язати.

Труднощі, що зустрічаються при вирішенні багатьох задач за допомогою диференціальних рівнянь з частковими похідними, примусили шукати необхідні рішення експериментальним шляхом .

За дослідними даними, які отримані на одному апараті, робились приблизні висновки про можливу роботу іншого, – такого ж, але більшого за габаритами апарата. Це й привело до ідеї моделювання процесів і апаратів на основі теорії подібності.

Теорія подібності – наука про подібність явищ.

Основні технологічні процеси протікають, головним чином, внаслідок руху в'язких (стисливих і нестисливих) рідин, а також в результаті теплообміну і дифузії, внаслідок чого при їхньому моделюванні особливе значення мають гідродинамічна, теплова і дифузійна подібність.

Тому перш ніж перейти до розгляду теорії подібності і методу аналізу розмірностей необхідно розглянути рівняння гідродинаміки, теплообміну і дифузії.

Рух в'язкої рідини

Розглянемо несталий рух рідини, при якому швидкості і тиски в кожній точці потоку змінюються з часом .

Виділимо в потоці рухомої рідини елементарний паралелепіпед з ребрами dx , dy і dz (рис. 11.1).

Внаслідок нерозривності потоку, увесь об'єм виділеного паралелепіпеда буде постійно заповнений рухомою рідиною. При цьому маса стисливої рідини, яка надходить і виходить з паралелепіпеду, у загальному випадку буде різною, що обумовлене непостійністю величин швидкості w і густини ρ .

Через ліву грань A , паралельну площині YOZ , рідина рухається під впливом складової швидкості v_x , паралельної вісі OX . Будемо вважати цю складову, а також густину ρ постійними в усіх точках цієї грані і рівними їхнім значенням у точці A :

$$v_x = f_1(x, y, z, t), \quad \rho = f_2(x, y, z, t), \quad t - \text{час.}$$

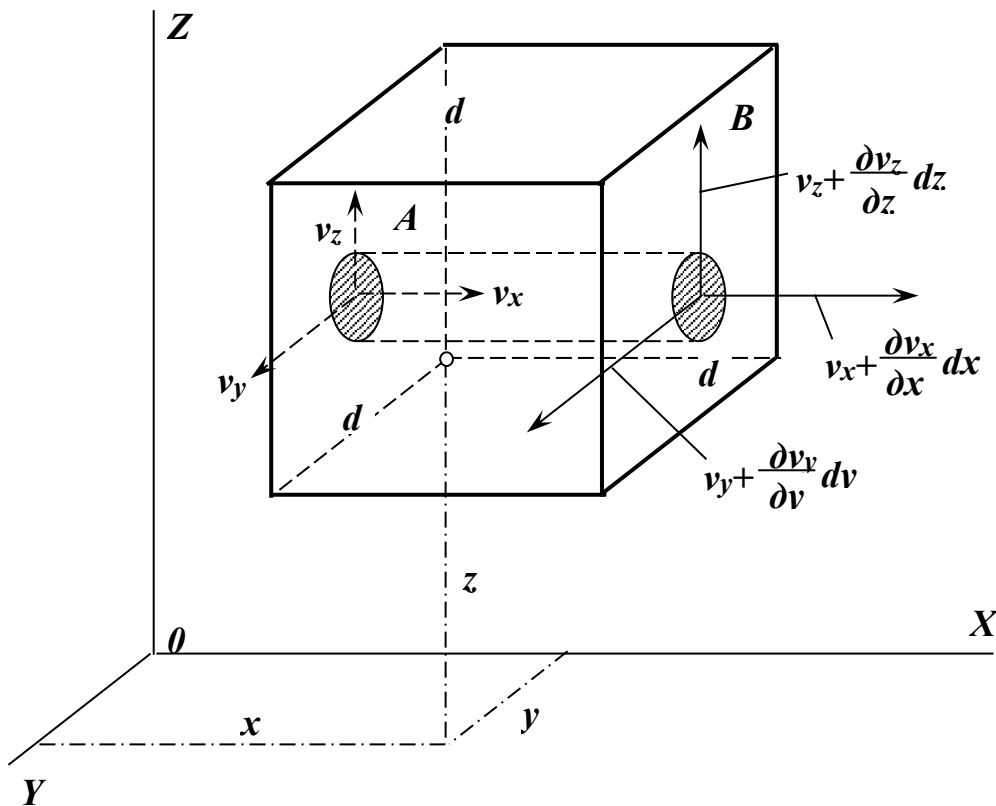


Рис. 11.1 – Елемент рідини у русі.

У той же момент часу для протилежної правої грані B ці величини будуть:

$$v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx; \quad \rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx.$$

Через площадку $dydz$ лівої грані за одиницю часу витікає кількість рідини (в одиницях маси):

$$dM_{x1} = \rho v_x dydz.$$

Маса рідини, що витікає через протилежну грань за цей час буде:

$$dM_{x2} = \left[\rho v_x + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) dx \right] dydz.$$

Таким чином, приріст маси рідини за одиницю часу у паралелепіпеді, є причиною різниці значень v_x і ρ на лівій і правій його гранях, він дорівнює:

$$\Delta M_x = \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) dx dydz.$$

Аналогічно отримуємо для напрямків перпендикулярних осям OY і OZ :

$$\Delta M_y = \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) dx dydz;$$

$$\Delta M_z = \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) dx dydz.$$

Повний приріст маси рідини в паралелепіпеді за одиницю часу буде:

$$\Delta M = \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) \right] dx dy dz. \quad (11.1)$$

При нерозривності потоку зміна маси в об'ємі $dx dy dz$ спричиняється зміною густини рідини у цьому об'ємі, тобто:

$$\Delta M = - \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz. \quad (11.2)$$

Після прирівнювання рівнянь (2.1) і (2.2) і ділення на $dx dy dz$ отримуємо:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0. \quad (11.3)$$

Отримане рівняння називається рівнянням нерозривності або суцільності.

У окремих випадках рівняння суцільності приймає такий вигляд:

– для краплинної рідини ($\rho = \text{const}$):

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

або у векторній формі

$$\text{div } \vec{v} = 0.$$

Тобто, при нерозривному русі рідини об'єм її, який втікає у деяку обмежену частину простору, дорівнює об'єму, який витікає з нього за той же час;

– для однорідного газу [$\rho = f_2(t)$]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0$$

або у векторній формі

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{v} = 0;$$

– для сталого руху $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \right)$:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0$$

або у векторній формі

$$\operatorname{div} (\rho \vec{v}) = 0.$$

З рівняння (2.3) за умови $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \right)$ знаходимо, що для даного простору

при сталому русі рідина не змінює своєї маси, тобто маси рідини, яка втікає і витікає, рівні між собою.

В будь якій точці рухомого потоку повинна мати місце рівновага сил, які обумовлюють рух. Такими силами є сила ваги, сили тиску (перепад тиску) і сили тертя. Для одержання рівняння руху виділимо у рідині, яка знаходиться в русі, елементарний паралелепіпед об'ємом dW з ребрами dx , dy і dz .

Знаходимо проекції на вісь OX (рис. 2.2) сили ваги, сили тиску і сили тертя, які діють на цей елементарний об'єм.

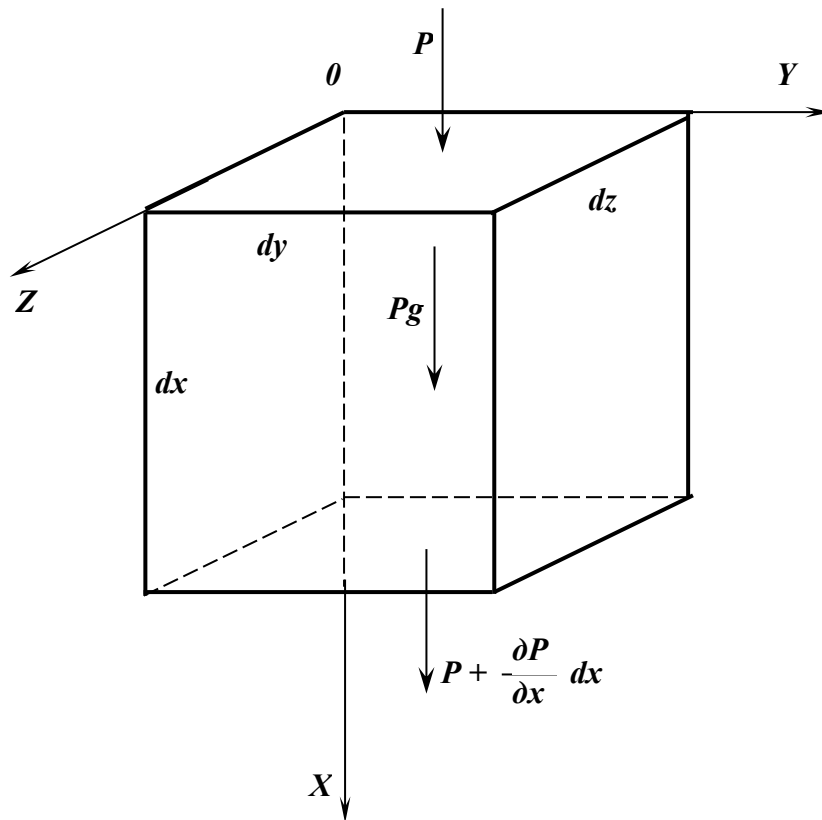


Рис. 11.2 – Сили, які діють на елементарний об'єм рідини.

Для сили ваги, яка прикладена в центрі ваги елемента dW , маємо:

$$g_x \rho dW = g_x \rho dx dy dz, \quad (2.4)$$

де g_x – проекція прискорення сили ваги (м/с^2) на OX .

Позначимо питомий тиск рідини p кг/м^2 , тоді сила тиску рідини на верхню грань елемента буде дорівнювати $p dy dz$, а на нижню:

$$-\left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx\right) dy dz,$$

де $\frac{\partial p}{\partial x} dx$ – зміна гідростатичного тиску в напрямку осі OX по всій довжині

ребра dx ; ця сила діє проти напрямку руху рідини.

Проекція рівнодіючої сил тиску буде:

$$pdydz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dydz = -\frac{\partial p}{\partial x} dx dydz. \quad (2.5)$$

Дію сили тертя розглянемо спочатку на прикладі руху плоского ламінарного потоку, в якому проекція швидкості v_x залежить тільки від y . У цьому випадку сила тертя виникає тільки на бокових гранях елемента.

Напрямки і величина сил тертя показані на рис. 11.3.

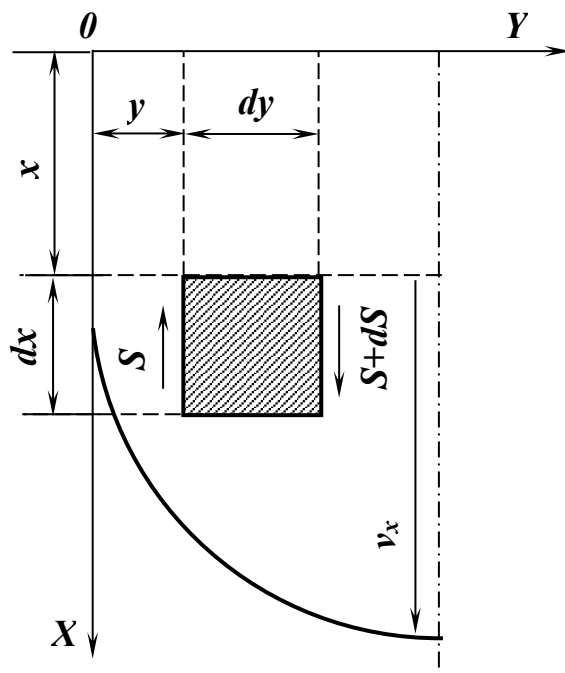


Рис. 2.3 – Напрямки і величина сил тертя.

У перетині y сила тертя дорівнює $-S dx dz$ і направлена проти руху, тому що швидкість рідини тут менше, ніж у самому елементі. В перетині $y + dy$ сила тертя дорівнює

$$\left(S + \frac{\partial S}{\partial y} dy \right) dx dz$$

і направлена у бік руху, оскільки у цьому випадку швидкість рідини більша, ніж у самому елементі.

Проекція рівнодіючих цих сил визначається як:

$$\left(S + \frac{\partial S}{\partial y} dy \right) dx dz - S dx dz = \frac{dS}{dy} dx dy dz ,$$

де S – сила тертя на одиницю поверхні.

Але за законом Стокса

$$S = \mu \frac{dw_x}{dy} ,$$

де μ – в'язкість середовища.

Після сумісного рішення рівнянь (11.6) і (11.7) маємо:

$$\frac{dS}{dy} dW = \mu \frac{d^2 v_x}{dy} dW .$$

У загальному випадку, коли швидкість v_x змінюється в усіх трьох напрямках, проекція сили тертя на вісь OX буде:

$$\mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) dW = \mu \nabla^2 v_x dW ,$$

де символ $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа, який позначає суму

других часткових похідних від проекції швидкості на вісь OX .

Сумуючи проекції (2.4), (2.5) і (2.8), отримуємо проекцію рівнодіючої усіх сил, прикладених до об'єму dW , на вісь OX :

$$\left[\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \right] dW.$$

Ця рівнодіюча дорівнює добутку маси елемента dW на його прискорення $\frac{Dv_x}{dt}$:

$$\rho \frac{Dv_x}{dt} dW = \rho \left[\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right] dW.$$

Символ $\frac{Dv_x}{dt}$ називається повною або субстанціональною похідною v_x

по t . Цю похідну слід розуміти таким чином: швидкість зміни v_x в даній точці характеризується частковою (або локальною) похідною v_x по t :

$$, \quad \frac{\partial v_x}{\partial t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v_x(M, t + \Delta t) - v_x(M, t)}{\Delta t},$$

де M позначає будь яку постійну геометричну точку у просторі.

Щоб охарактеризувати зміну v_x для даної частинки рідини за проміжок часу Δt , слід за приріст v_x прийняти різницю між значеннями функції v_x в момент $t + \Delta t$ в тому положенні частинок M' , в якому вона знаходиться у той момент, і значенням функції v_x в момент t у початковому положенні її M . Межа відношення цього приросту до Δt при $\Delta t \rightarrow 0$ й називається субстанціональною похідною.

Зв'язок між частковою і повною похідними полягає у тому, що, коли складається повна похідна від функції $v(x, Y, Z, t)$ вважають x, y, z функціями від t , тому що частинка, яка мала в момент t координати x, y, z , за час Δt переміститься по деякій кривій.

З використанням рівнянь (2.9) і (2.10) отримуємо:

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} + \rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right). \quad (11.12)$$

Аналогічно отримуємо рівняння для рівнодіючих проекцій сил на вісі OY і OZ .

$$\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} + \rho \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right), \quad (11.13)$$

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} + \rho \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right). \quad (11.14)$$

Рівняння (11.12), (11.13) і (11.14) утворюють систему диференціальних рівнянь руху нестислої рідини Нав'є-Стокса; ця система справедлива як для ламінарного, так і для турбулентного руху.

Якщо μ постійне, рівняння (11.12), (11.13) і (11.14) можна звести до одного векторного:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \text{grad}) \vec{v} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \mathcal{G} \nabla^2 \vec{v}, \quad (11.15)$$

де $\mathcal{G} = \frac{\mu}{\rho}$ – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с.

Рівняння Нав'є-Стокса можуть бути отримані також і для стисливих рідин. Рівняння відносно вісі OX має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p'}{\partial x} + \\ &+ \mu \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (11.16)$$

Такі ж рівняння мають місце у напрямках OY і OZ .

До цих рівнянь додаємо ще й рівняння теплового балансу. Тепло, яке надходить у одиничний об'єм при сталому стані, дорівнює такій же кількості

тепла, яке видаляється з цього ж об'єму. До даного об'єму, так як і в рівнянні (2.12), тепло підводиться внаслідок теплопровідності і за допомогою матеріальних частинок, які протікають через одиничний об'єм при одночасному його охолодженні. Якщо температура τ цього об'єму не змінюється з часом, то спільна кількість підведеного тепла повинна дорівнюватися нулю, і якщо врахувати наявність джерела тепла з інтенсивністю q_i (ккал/м³), то отримуємо таке рівняння:

$$c\rho\left(v_x \frac{\partial \tau}{\partial x} + v_y \frac{\partial \tau}{\partial y} + v_z \frac{\partial \tau}{\partial z}\right) = \lambda\left(\frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2}\right) + q_i, \quad (11.17)$$

де c – теплоємність, ρ – густина, λ – теплопровідність.

У лівій частині рівняння (2.17) представлена кількість тепла в одиничному об'ємі, яке використовується для нагрівання на $d\tau$ частинок, що протікають через паралелепіпед з ребрами dx , dy , dz . Це тепло покривається за рахунок підводу тепла з оточуючого середовища (перший член правої частини рівняння) і за рахунок джерела тепла q_i . Після ділення обох частин рівняння на $c\rho$ отримаємо:

$$v_x \frac{\partial \tau}{\partial x} + v_y \frac{\partial \tau}{\partial y} + v_z \frac{\partial \tau}{\partial z} = a\left(\frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2}\right) + \frac{q_i}{c\rho} \quad (11.18)$$

або у векторній формі

$$(\vec{v}, \text{grad} \tau) = a \nabla^2 \tau + \frac{q_i}{c\rho}. \quad (11.19)$$

Система з п'яти диференціальних рівнянь (2.3), (2.12), (2.13), (2.14) і (2.18) з частковими похідними сумісно з межовими і початковими умовами повністю описує процес руху в'язкої рідини.

Поблизу стінок потік є ламінарним, відповідно, передача тепла відбувається в результаті теплопровідності:

$$dq = -\lambda \left(\frac{\partial \tau}{\partial n} \right)_F dF, \quad (11.20)$$

де dF – поверхня теплообміну; n – нормаль до dF ; $\left(\frac{\partial \tau}{\partial n} \right)_F$ – температурний градієнт рідини безпосередньо біля стінки.

Кількість тепла, що передається звичайно виражають за допомогою коефіцієнта тепловіддачі α (ккал/м²·год·град), з використанням формули Ньютона:

$$Q = \alpha(\tau_F - \tau_0)F\tau, \text{ ккал} \quad (11.21)$$

або

$$\frac{Q}{t} = q = \alpha(\tau_F - \tau_0)F, \text{ ккал/год.} \quad (11.22)$$

Незважаючи на те, що коефіцієнт тепловіддачі не входить у рівняння (1.3) – (2.20), він часто застосовується у теплових розрахунках. Після диференціювання рівняння (2.22) отримуємо:

$$dq = \alpha(\tau_F - \tau_0)dF = -\lambda \left(\frac{\partial \tau}{\partial n} \right)_F dF, \quad (11.23)$$

де τ_F – температура стінки; τ_0 – температура рідини.

Таким чином, маємо:

$$\alpha = -\frac{\lambda \left(\frac{\partial \tau}{\partial n} \right)_F}{\tau_F - \tau_0}. \quad (11.24)$$

Ця залежність дозволяє коефіцієнт тепловіддачі α ввести у систему диференціальних рівнянь для конвективної теплопередачі. Оскільки температурний градієнт $\left(\frac{\partial \tau}{\partial n}\right)_F$ в формулі (2.24) залежить від температур стінки і рідини і від товщини пограничного шару, тобто від характеру (режиму) руху, то, відповідно, й коефіцієнт тепловіддачі α залежить від усіх величин, які містяться в рівняннях (11.3) – (11.20).

2.1.2 Умови застосування теорії подібності

У випадку *геометричної подібності* двох фігур відношення усіх відповідних розмірів цих фігур постійне. Геометричні фігури подібні між собою, якщо їхні відповідні кути рівні, а східні сторони пропорційні, тобто:

$$\frac{l'_1}{l_1} = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{l'_3}{l_3} = A, \quad (11.25)$$

де A – коефіцієнт пропорційності, або константа подібності.

Таким чином, умова (2.25) є математичним формулюванням геометричної подібності двох фігур (моделі і виробничого апарата).

У двох кінематичних схемах буде мати місце *кінематична подібність*, якщо їхні схожі частинки переміщуються по геометрично подібним шляхам в проміжки часу, що відрізняються постійним множником, тобто у цьому випадку можна говорити про подібність руху, наприклад двох потоків рідини.

При *динамічній подібності* багатокутники сил, побудовані для пари схожих частинок, розташованих подібним чином у просторі і часі, повинні бути подібні, тобто розрізнятися тільки масштабом. Поняття подібності можна також поширити на теплові і фізико-хімічні процеси.

З використанням цього поняття можна вирішити багато практично важливих задач. Але для використання понять про подібність необхідно знайти умови подібності явищ, які розглядаються. При цьому виникають такі питання:

- чи можна відомі експериментальні дані, наприклад, такі, що пов'язані з температурним полем, отримані шляхом вимірювання на одному апараті (на моделі), перенести на інший апарат (виробничий);
- які повинні бути умови, що допускають таке перенесення або перерахунок;
- що слід зробити, щоб отримані під час експерименту на моделі дані були правильно застосовані для виробничого апарата.

Перенесення експериментальних даних з моделі на виробничий апарат можливе у таких випадках, де існує подібність обох процесів. Ця подібність не повинна обмежуватися тільки геометричними формами; усі інші величини, які впливають на процес, повинні в моделі і у промисловому апараті знаходитися у визначених відношеннях.

Визначення умов подібності здійснюється таким чином: порівнюються такі два випадки, при яких потоки для усіх величин, що зустрічаються в рівняннях (11.3) – (11.24), подібні.

1. Такими є координати x, y, z промислового апарата, які відносно x', y', z' моделі можуть бути рівномірно збільшені. Отже порівнюються потоки, які проходять через геометрично подібні тіла або навколо них. Тоді усі відрізки потоку $l_1, l_2, l_3 \dots$ виробничого апарата, які відповідають $l'_1, l'_2, l'_3 \dots$ моделі, будуть збільшені у визначеній пропорції:

$$\frac{x'}{x} = \frac{y'}{y} = \frac{z'}{z} = \frac{l'_1}{l_1} = \frac{l'_2}{l_2} = \dots = \frac{l'}{l} = A_l. \quad (11.26)$$

Кути між відповідними відрізками залишаються незмінними.

2. Поле швидкостей у промисловому апараті і моделі повинно бути подібним. У відповідних точках з координатами x', y', z' і x, y, z відношення

$$\frac{v'}{v} = A_v \quad (11.27)$$

повинно бути однаковим, і крім того, напрямки відповідних швидкостей промислового апарата і моделі повинні бути одним і тим же (рівність кутів). Отже не можна намагатися знайти подібність між ламінарним і турбулентним потоками, тому що розподіл швидкостей в обох потоках різний. Можна порівнювати тільки ламінарні потоки між собою і турбулентні потоки між собою.

3. Наступною важливою величиною є температурний градієнт $\frac{\partial \tau}{\partial x}, \frac{\partial \tau}{\partial y}, \frac{\partial \tau}{\partial z}$. Розподіл градієнтів повинний бути подібним, тобто

$$\frac{\partial \tau' / \partial x'}{\partial \tau / \partial x} = \frac{\partial \tau' / \partial y'}{\partial \tau / \partial y} = \frac{\partial \tau' / \partial z'}{\partial \tau / \partial z} = A_{grad \tau}. \quad (11.28)$$

З рівнянь (2.26) і 2.28) маємо:

$$d\tau' = A_{grad \tau} \cdot A_l d\tau = A_\tau d\tau \quad (11.29)$$

де

$$A_{grad \tau} \cdot A_l = A_\tau. \quad (11.30)$$

Після інтегрування рівняння (2.29) отримуємо:

$$\tau' - \tau'_0 = A_\tau (\tau - \tau_0) \quad (11.31)$$

або

$$\frac{\tau' - \tau'_0}{\tau - \tau_0} = A_\tau, \quad (11.32)$$

де температури τ'_0 і τ_0 – довільні постійні інтегрування для відповідних, але довільно вибраних точок x'_0, y'_0, z'_0 і x_0, y_0, z_0 . В моделі і промисловому апараті температури τ'_0 і τ_0 можуть бути вибрані, наприклад, поблизу вводу в трубопровід або на великій відстані від стінки залежно від доцільності. В рівняння подібності температурних полів входять, таким чином, не власне температури, а їхні різниці по відношенню до температури вибраної точки.

З рівнянь (11.26), (11.28) і (11.29) випливає:

$$\frac{\partial \tau' / \partial x'}{\partial \tau / \partial x} = \frac{A_\tau}{A_l}; \quad \frac{\partial^2 \tau' / \partial x'^2}{\partial^2 \tau / \partial x^2} = \frac{A_\tau}{A_l^2} \quad (11.33)$$

У багатьох випадках має значення дотримання подібності градієнтів концентрацій в матеріальних потоках, які проходять через апарати. Умови подібності концентраційних і температурних градієнтів аналогічні.

4. Статичний тиск представлений у диференціальних рівняннях зокрема у

вигляді градієнтів $\frac{\partial p}{\partial x}$; за аналогією з температурним полем можна написати

умови подібності для поля тиску:

$$\frac{p' - p'_0}{p - p_0} = A_p. \quad (11.34)$$

5. Подібність полів фізичних властивостей середовища обумовлює такі постійні співвідношення для усіх відповідних точок виробничого (промислового) апарата і моделі:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\alpha'}{\alpha} = A_{\alpha}; \quad \frac{\rho'}{\rho} = A_{\rho}; \quad \frac{g'}{g} = A_g \\ \frac{c'}{c} = A_c; \quad \frac{\lambda'}{\lambda} = A_{\lambda}; \quad \frac{\mu'}{\mu} = A_{\mu} \end{aligned} \right\} \quad (11.35)$$

Слід відмітити, що при виконанні умов подібності не всі масштабні множники (числа) (2.28) – (2.35) можуть бути довільно вибрані. Інші визначаються після вибору деяких небагатьох основних величин. Тобто число незалежних масштабних множників у порівнянні з наведеними у рівняннях (2.26) – (2.35) може суттєво скоротитися внаслідок додаткових умов.

Якщо дві системи подібні, то в межах кожної системи відношення будь-яких схожих величин, що характеризують той або інший стан, є безрозмірним і постійним для обох систем. Так, наприклад, фізичний стан однієї із систем характеризується деякими величинами $R_1, R_2, \dots, R_n$, а іншої подібної системи – величинами $r_1, r_2, \dots, r_n$. Тоді умова подібності потребує рівності:

$$R_1/R_2 = r_1/r_2 = i. \quad (11.36)$$

Тобто відношення схожих величин в одній системі дорівнює їхньому відношенню в подібній системі. Ці постійні безрозмірні відношення називаються **інваріантами подібності** і позначаються символом i .

Інваріанти подібності, які є відношеннями простих однорідних величин, наприклад, лінійних розмірів l/d , тисків p_1/p_2 , в'язкостей μ_1/μ_2 і т.п., називаються **симплексами подібності**.

Інваріанти подібності можуть бути виражені й більш складними безрозмірними відношеннями, складеними з декількох простих параметрів, наприклад $dV\rho/\mu$. У цьому випадку вони називаються критеріями подібності, які можуть бути визначальними і невизначальними. Визначальними критеріями є такі, у яких величини задані наперед умовами однозначності. Критерії, що містять шукану величину, називаються невизначальними.

В основі теорії подібності лежать три теореми, які формулюються таким чином:

I теорема. Якщо фізичні процеси подібні один одному, однойменні критерії подібності цих процесів мають однакову величину.

II теорема. Рівняння, які описують фізичні процеси, можуть бути представлені у вигляді функціонального зв'язку між критеріями подібності.

III теорема. Для того щоб фізичні процеси були подібні один одному, необхідно і достатньо, щоб ці процеси були якісно однакові, а їхні однойменні визначальні критерії – чисельно однакові.

Диференціальні рівняння теплообміну для моделі

Диференціальні рівняння теплообміну для моделі напишемо у відповідності з рівняннями. але у даному випадку усі вхідні величини забезпечимо штрихами, на відміну від величин для виробничого апарата [9, 11].

Вважаючи, що $q_i = q'_i = 0$, отримуємо (для осі OX'):

$$\frac{\partial(\rho'v'_x)}{\partial x'} + \frac{\partial(\rho'v'_y)}{\partial y'} + \frac{\partial(\rho'v'_z)}{\partial z'} = 0; \quad (11.37)$$

$$\begin{aligned} \rho' \left(v'_x \frac{\partial v'_x}{\partial x'} + v'_y \frac{\partial v'_y}{\partial y'} + v'_z \frac{\partial v'_z}{\partial z'} \right) &= \rho' g'_x - \frac{\partial p'}{\partial x'} + \\ + \mu' \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\partial v'_x}{\partial x'} + \frac{\partial v'_y}{\partial y'} + \frac{\partial v'_z}{\partial z'} \right) + \frac{\partial^2 v'_x}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 v'_y}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 v'_z}{\partial z'^2} \right] \end{aligned} \quad (11.38)$$

Подібні рівняння можна скласти й для проєкцій на вісі OY' і OZ' .

Аналогічно рівнянню (2.18) маємо:

$$v'_x \frac{\partial \tau'}{\partial x'} + v'_y \frac{\partial \tau'}{\partial y'} + v'_z \frac{\partial \tau'}{\partial z'} = a' \left(\frac{\partial^2 \tau'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \tau'}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 \tau'}{\partial z'^2} \right); \quad (2.39)$$

$$\alpha' = - \frac{\lambda' \left(\frac{\partial \tau'}{\partial n'} \right)_F}{\tau'_F - \tau'_0}. \quad (11.40)$$

У ці рівняння відповідно до співвідношень (2.28) – (2.35) можна підставити $x' = A_i x$, $v' = A_v v$, $\rho' = A_\rho \rho$, де величини без штриха відносяться до виробничого апарата. Таким чином, з рівняння (11.37) отримуємо:

$$\frac{A_\rho A_v}{A_l} \rho \left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] = 0, \quad (11.41)$$

а з рівняння (2.38) маємо:

$$\begin{aligned} \frac{A_\rho A_v^2}{A_l} \rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \dots \right) &= A_\rho A_g \rho g_x - \frac{A_p}{A_l} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \\ &+ \frac{A_\mu A_v}{A_l^2} \mu \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \dots \right) + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \dots \right] \end{aligned} \quad (11.42)$$

Аналогічні рівняння отримують і для напрямків OY і OZ . З рівняння (2.39) маємо:

$$A_v \frac{A_\tau}{A_l} \left(v_x \frac{\partial \tau}{\partial x} + \dots \right) = \frac{A_\lambda A_\tau}{A_c A_\rho A_g A_l^2} \left(\frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \dots \right), \quad (11.43)$$

а з рівняння (2.40) отримуємо:

$$A_\alpha \alpha = - \frac{A_\lambda}{A_l} \cdot \lambda \frac{\left(\frac{\partial \tau}{\partial n} \right)_F}{\tau_F - \tau_0}. \quad (11.44)$$

Подібними вважають тільки такі процеси, для яких масштабні значення A_l , A_v , A_τ та ін. є такими, що множники, які стоять перед дужками в рівняннях (2.41) – (2.44) однакові, тобто:

$$\frac{A_\rho A_v^2}{A_l} = A_\rho A_g = \frac{A_p}{A_l} = \frac{A_\mu A_v}{A_l^2}; \quad (11.45)$$

$$A_v \frac{A_\tau}{A_l} = \frac{A_\lambda A_\tau}{A_c A_\rho A_g A_l^2}; \quad (11.46)$$

$$A_\alpha = \frac{A_\lambda}{A_l}. \quad (11.47)$$

Отже, якщо чисельні значення задовольняють рівнянням (11.45) – (11.47), то в рівняннях (11.41) – (11.44) масштабні множники можуть бути скорочені і для моделі залишається система диференціальних рівнянь, які повністю ідентичні рівнянням для виробничого апарата, а саме – рівнянням (11.3), (11.12), (11.13), (11.16), і (11.18).

Інтеграли диференціальних рівнянь для апарата і моделі також будуть ідентичні. Це означає, що тільки у цьому випадку поширення потоків з

швидкісними і температурними полями у просторі моделі і промислового апарата відбувається однаково.

Звідси витікає наступне положення: подібними процесами теплообміну у сталому стані при відсутності джерел тепла є тільки такі, у яких масштабні множники задовольняють рівнянням (11.45) – (11.47). Таким чином, з числа масштабних множників п'ять виражаються через інші за допомогою рівнянь (11.45) – (11.47).

Далі представимо рівняння (11.45) – (11.47) в більш зручній формі – у вигляді рівнянь в критеріях подібності.

Гідродинамічна подібність

Для з'ясування умов, при дотриманні яких рівняння руху будуть подібні, або рухи подібні, розглянемо рівняння Нав'є-Стокса (11.12) – (11.14) для випадку плоского потоку в безрозмірному вигляді. За масштаб довжини вибираємо будь-який характерний розмір тіла (напр., діаметр або радіус труби), а за масштаби швидкостей, тисків, густин, температур та ін. – їхні характерні значення (на нескінченності, середні за об'ємними, масовими витратами та ін.) [9].

Позначимо безрозмірні величини тими ж буквами, що й розмірні, але з рискою і зробимо таку заміну:

$$x = l\bar{x}, \quad y = l\bar{y}, \quad \rho = \rho_0\bar{\rho}, \quad v_x = V_0\bar{v}_x, \quad v_y = V_0\bar{v}_y,$$

$$\vartheta = \vartheta_0\bar{\vartheta}, \quad t = t_0\bar{t}, \quad X = g\bar{X}, \quad Y = g\bar{Y}, \quad p = p_0\bar{p}.$$

За масштаб часу прийнятий час, характерний для даного руху, а за масштаб масових сил, віднесених до одиниці маси, – прискорення сили ваги.

Після підстановки вказаних величин у рівняння (11.12) – (2.14) одержимо рівняння плоского руху і рівняння нерозривності для нестисливої рідини у безрозмірній формі:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{V_0}{t_0} \cdot \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{t}} + \frac{V_0^2}{l} \left(\bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{y}} \right) &= g\bar{X} - \frac{p_0}{\rho_0 l} \cdot \frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + \frac{g_0 V_0}{l^2} \bar{g} \nabla^2 \bar{v}_x; \\
\frac{V_0}{t_0} \cdot \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial \bar{t}} + \frac{V_0^2}{l} \left(\bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial \bar{x}} + \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial \bar{y}} \right) &= g\bar{Y} - \frac{p_0}{\rho_0 l} \cdot \frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + \frac{g_0 V_0}{l^2} \bar{g} \nabla^2 \bar{v}_y;
\end{aligned} \right\}$$

(11.48)

$$\frac{V_0}{l} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial \bar{y}} \right) = 0.$$

Розділимо перші два рівнянні на $\frac{V_0^2}{l}$, а третє на $\frac{V_0}{l}$ і опустимо для простоти risks над безрозмірними величинами, після чого отримуємо:

$$\frac{l}{V_0 t_0} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial t} + \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \frac{gl}{V_0^2} X - \frac{p_0}{\rho_0 V_0^2} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{g_0}{V_0 l} g \nabla^2 v_x;$$

$$\frac{l}{V_0 t_0} \cdot \frac{\partial v_y}{\partial t} + \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = \frac{gl}{V_0^2} Y - \frac{p_0}{\rho_0 V_0^2} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{g_0}{V_0 l} g \nabla^2 v_y;$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0.$$

З цієї системи рівнянь витікає, що якщо два потоки подібні, тобто вони описуються однаковими рівняннями з однаковими межевими і початковими умовами, представленими в безрозмірному вигляді, то для них повинні бути однаковими за величиною такі безрозмірні величини, які мають свої власні назви:

$$\frac{l}{V_0 t_0} = Sh - \text{число Струхала} \text{ характеризує залежність складових}$$

інерційних сил від часу;

$$\frac{V_0}{\sqrt{gl}} = Fr - \text{число Фруда} \text{ відбиває відношення сил інерції до сил}$$

гравітації;

$$\frac{p_0}{\rho V_0^2} = Eu - \text{число Ейлера} \text{ відбиває відношення сил тиску й сил інерції};$$

$$\frac{V_0 l}{\eta} = Re - \text{число Рейнольдса} \text{ відбиває відношення сил інерції й в'язкості}.$$

Для повного моделювання необхідна повна подібність процесів, тобто рівність чисел подібності. При використанні даних, отриманих на моделі, повинні бути задоволені для усіх відповідних точок на моделі і у виробничому апараті три умови:

$$Re = \text{idem}; \quad Eu = \text{idem}; \quad Sh = \text{idem}. \quad (11.49)$$

Однак теорія і практика показують, що при однорідних потоках в моделі і виробничому апараті встановлюються такі профілі швидкостей, які подібні між собою. Тому, для того щоб упевнитися в подібності процесів, немає необхідності перевіряти наявність умов (2.49) для усіх подібних точок. Якщо, наприклад, у трубопроводі по його осі знайдено, що $Re = \text{idem}$ для виробничого апарата і моделі, то відповідно цьому $Re = \text{idem}$ також для інших точок перетину потоку. Однорідними потоками називають такі, які мають подібні режими руху (турбулентний, ламінарний), початкові умови (профіль швидкостей на вході у апарат), крайові умови. Остання умова у відношенні до

швидкостей завжди виконується внаслідок того, що швидкості біля стінки як в моделі, так і у виробничому апараті завжди рівні нулю.

Інші умови подібності – *геометрична подібність* (у тому числі й шорсткість поверхні) та інші повинні бути також виконані. Але виникає питання: чи можливе взагалі дотримання усіх умов подібності і якщо так, то при яких обставинах.

Якщо, наприклад, при протіканні рідини в трубопроводі (тверді межі) з'являються вільні поверхні рідини, то для їхнього врахування було б необхідно ввести додаткові умови подібності, які визначаються фізичними законами їхнього утворення. Тобто при вільних поверхнях неможливо одночасно виконати усі умови подібності. Те ж саме відбудеться, якщо властивості речовини (в'язкість, густина та ін.) не є постійними і змінюються з температурою вздовж потоку.

Для потоків, де ці труднощі не мають місця, число умов подібності можна скоротити, виходячи з наступних міркувань. Для стаціонарних процесів числа Sh не мають значення. Перепад тиску в потоці буде залежати від швидкісних характеристик потоку, тобто $Eu = f(Re)$. Таким чином, при вивченні руху рідини найбільш істотним буде число Re . Число Re здобуває вирішальне значення при визначенні структури потоків (ламінарних і турбулентних). Структура потоку визначає процес переносу маси, кількості руху, тепла.

Тобто, як правило, використовують приблизне моделювання, при якому подібність зберігається за числами найбільш характерними для даного процесу.

2.1.5 Теплова подібність

Аналогічно гідродинамічній подібності розглянемо умови теплової подібності. По-перше розглянемо випадок чистої теплопровідності, тобто

переносу тепла молекулярним способом без конвекції [11]. У цьому випадку рівняння переносу тепла має вигляд:

$$c_p \rho \frac{\partial \tau}{\partial t} = \lambda \nabla^2 \tau, \quad (11.50)$$

де c_p – питома теплоємність рідини.

Приведемо це рівняння до безрозмірного вигляду, для чого введемо такі безрозмірні величини:

$$c_p = \bar{c}_p c_{p0}; \quad \rho = \bar{\rho} \rho_0; \quad \tau = \bar{\tau} \tau_0; \quad \lambda = \bar{\lambda} \lambda_0; \quad x = \bar{x} l; \quad t = \bar{t} t_0,$$

де $\bar{c}_p$, $\bar{\rho}$, $\bar{\tau}$, $\bar{\lambda}$, $\bar{x}$, $\bar{t}$ – безрозмірні величини; c_{p0} , ρ_0 , τ_0 , λ_0 , l , t_0 – характерні розмірні величини (масштаби).

$$\text{Розглянемо одномірний рух, тобто } \tau = \tau(t, x), \text{ тоді } c_p \rho \frac{\partial \tau}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2}.$$

Після підстановки прийнятих співвідношень у рівняння переносу тепла отримуємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{c_{p0} \rho_0 \tau_0}{t_0} \bar{c}_p \bar{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{x}^2} &= \frac{\lambda_0 \tau_0}{l^2} \bar{\lambda} \frac{\partial^2 \bar{\tau}}{\partial \bar{x}^2}, \\ \text{або} \end{aligned} \right\} \quad (11.51)$$

$$\bar{c}_p \bar{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{t}} = \frac{\lambda_0}{c_{p0} \rho_0} \cdot \frac{t_0}{l^2} \bar{\lambda} \frac{\partial^2 \bar{\tau}}{\partial \bar{x}^2}.$$

де $\alpha_\tau = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, а

$$\frac{\alpha_\tau l}{l^2} = Fu - \text{число Фур'є, яке характеризує нестационарність процесу}$$

молекулярного переносу тепла.

Далі розглянемо випадок конвективного переносу тепла. Для випадку одномірного сталого руху відповідне рівняння буде:

$$v_x \frac{\partial \tau}{\partial x} = \alpha_\tau \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2}.$$

Після введення безрозмірних величин отримуємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_0 \tau_0}{l} \bar{v}_x \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{x}} &= \frac{\alpha_0 \tau_0}{l^2} \bar{\alpha}_\tau \frac{\partial^2 \bar{\tau}}{\partial \bar{x}^2} \\ \bar{v}_x \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{x}} &= \frac{\alpha_0 \tau_0}{V_0 l} \bar{\alpha}_\tau \frac{\partial^2 \bar{\tau}}{\partial \bar{x}^2} \end{aligned} \right\} \quad (11.52)$$

Тобто для подібності процесів необхідно дотримуватися рівності величини $\frac{\alpha_0}{V_0 l}$, а зворотна їй величина називається числом Пекле.

$$\frac{V_0 l}{\alpha_\tau} = Pe - \text{число Пекле характеризує конвективний перенос тепла.}$$

Очевидно, що малі значення числа Pe відповідають дуже малому конвекційному переносу у загальному переносі тепла. Отже, при значеннях чисел $Pe < 1$ спостерігається тільки молекулярний перенос, тобто теплопровідність, тоді як при великих значеннях числа Pe роль молекулярного переносу буде незначна.

Перенос тепла з поверхні F при різниці температур в потоці і на стінці $\tau_l - \tau_w$ можна представити у вигляді:

$$Q = -\lambda \frac{\partial \tau}{\partial n} Ft = \alpha(\tau_1 - \tau_w) Ft, \quad (11.53)$$

де τ_1 – температура оточуючого середовища; τ_w – температура стінки; α – коефіцієнт теплопереносу.

Для густини теплового потоку маємо:

$$q = -\lambda \frac{\partial \tau}{\partial n} = \alpha(\tau_1 - \tau_w). \quad (11.54)$$

Запишемо рівняння (2.54) в безрозмірному вигляді:

$$-\frac{\lambda_0 \tau_0}{l} \bar{\lambda} \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{n}} = \alpha_0 \tau_0 \bar{\alpha} (\bar{\tau}_1 - \bar{\tau}_w)$$

і після ділення на $\frac{\lambda_0 \tau_0}{l}$ одержимо:

$$-\bar{\lambda} \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial \bar{n}} = \frac{\alpha_0 l}{\lambda_0} \bar{\alpha} (\bar{\tau}_1 - \bar{\tau}_w),$$

звідси отримуємо число Нуссельта:

$$\frac{\alpha_0 l}{\lambda_0} = Nu - \text{число Нуссельта, яке можна розглядати як відношення}$$

дійсного теплового потоку, який визначається величиною коефіцієнта теплопереносу α , до питомого теплового потоку, що мав би місце в умовах чистої теплопровідності в шарі товщиною l , тобто:

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda/l}.$$

Якщо поділити число Pe на число Re , одержимо *число Прандтля*:

$$\frac{Pe}{Re} = \frac{\mathcal{G}_0}{\alpha_\tau} = \frac{\mathcal{G}_0 \rho_0 c_p}{\lambda_0} = \frac{c_p \mu_0}{\lambda_0} = Pr. \quad (11.55)$$

Число Pr характеризує відношення двох характеристик молекулярного переносу: кінематичної в'язкості $\mathcal{G}$ і коефіцієнта температуропровідності α_τ . Перенос імпульсу, пов'язаний з величиною $\mathcal{G}$, визначається різницею швидкостей, а перенос тепла, пов'язаний з величиною α_τ , визначається температурою. Отже, число Pr явно містить тільки величини, які визначають фізичні властивості середовища, і у дійсності характеризує відношення між полями швидкостей і температур. Тоді залежність $Nu = f(Re, Pr)$ можна трактувати таким чином: кількість тепла, яке переноситься (Nu) залежить від виду швидкісного поля (Re) і його зв'язку з полем температур (Pr).

Приведені вище рівняння дійсні тільки у тому випадку, якщо величини λ, c, ρ, μ, g та ін. по довжині потоку залишаються постійними, тому що тільки при цьому забезпечується постійність масштабних множників. Внаслідок того, що температура впливає на λ, ρ, μ , точне виконання умов подібності має місце дуже рідко.

2.1.6 Дифузійна подібність

Числа подібності для дифузійних процесів можна одержати з рівняння дифузії речовини [9, 11]. Для одномірного руху рівняння молекулярної дифузії має вигляд:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (11.56)$$

Після заміни у цьому рівнянні усіх величин безрозмірними і характерними значеннями (масштабами) отримуємо:

$$c = c_0 \bar{c}, \quad t = t_0 \bar{t}, \quad x = \bar{x}l;$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{c_0}{t_0} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{t}} &= \frac{Dc_0}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2} \\ \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{t}} &= \frac{Dt_0}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2} \end{aligned} \right\} \quad (11.57)$$

або

Безрозмірне число $\frac{Dt_0}{l^2}$ називається дифузійним числом Фур'є.

$$\frac{Dt_0}{l^2} = Fo - \text{дифузійне число Фур'є аналогічне тепловому числу Фур'є,}$$

але характеризує нестационарність процесу молекулярного переносу речовини.

При конвекційному переносі речовини для одномірного руху скористаємося рівнянням:

$$v_x \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (11.58)$$

Після виконання аналогічних операцій маємо:

$$\bar{v}_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} = \frac{D}{V_0 l} \cdot \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2}.$$

$$\frac{V_0 l}{D} = Pe_\partial - \text{дифузійне число Пекле, яке подібно числу } Re \text{ визначає}$$

структуру потоку.

Залежно від величини числа Pe_∂ у порівнянні з одиницею можна судити про характер переносу речовини. Якщо $Pe_\partial > 1$ молекулярною дифузією можна знехтувати у порівнянні з конвекційним переносом речовини. Якщо $Pe_\partial < 1$, навпаки молекулярна дифузія є визначальною.

Ділення числа Pe_∂ на число Re дозволяє отримати *дифузійне число Прандтля* Pr_∂ :

$$\frac{Pe_\partial}{Re} = \frac{\vartheta_0}{D} = Pr_\partial. \quad (11.59)$$

Дифузійне число Прандтля характеризує відношення двох характеристик переносу: кінематичної в'язкості ϑ і коефіцієнта дифузії D .

Коефіцієнт кінематичної в'язкості у рухомих рідинах типу води складає біля 10^{-6} м²/с, а коефіцієнт дифузії молекул і йонів у водних розчинах має порядок $D = 10^{-9}$ м²/с, макромолекул – $D = 10^{-10}$ м²/с. Тому у воді і подібних до неї рідинах $Pr_\partial \approx 10^3$. При зростанні в'язкості коефіцієнт дифузії зменшується за законом:

$$D = \frac{const}{\vartheta}, \quad (11.60)$$

тому число Pr_∂ зі збільшенням в'язкості зростає пропорційно її квадрату. У в'язких рідинах число Pr_∂ досягає значення 10^6 і більше.

Запишемо рівняння переносу речовини стосовно до різниці концентрацій на стінці і в оточуючому середовищі:

$$W = -D \frac{\partial c}{\partial n} = \alpha_\partial (c_1 - c_w), \quad (11.60)$$

де α_{∂} – коефіцієнт переносу маси; c_1 – концентрація речовини в оточуючому середовищі; c_w – концентрація речовини на стінці.

Після заміни у цьому рівнянні усіх величин безрозмірними і характерними значеннями (масштабами) отримуємо:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{Dc_0}{l} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{n}} &= \alpha_{\partial} c_0 (\bar{c}_1 - \bar{c}_w) \\ \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{n}} &= \frac{\alpha_{\partial} l}{D} (\bar{c}_1 - \bar{c}_w) \end{aligned} \right\} \quad (11.61)$$

або

З останнього рівняння отримуємо *локальне число Нуссельта*:

$$\frac{\alpha_{\partial} l}{D} = Nu_{\partial}. \quad (11.62)$$

Аналогічно тепловому числу Nu можна з використанням середнього коефіцієнта переносу речовини $\alpha_{cr,\partial}$ отримати середнє дифузійне число Нуссельта.

Подібність деяких часткових випадків переносу

Відомо, що на тіло, занурене у рідину діє гідростатична або архімедова сила. Її величина дорівнює вазі витиснутої тілом рідини і направлена у бік протилежний напрямку сил ваги [9]. Архімедова сила має важливе значення у тих випадках коли у рідинах є частинки з густиною, яка відрізняється від густини середовища. У цьому випадку критерієм подібності буде *число Архімеда*:

$$Ar = \frac{l^3}{g^2} g \frac{\rho - \rho_1}{\rho} = \frac{l^3}{g^2} g \frac{\Delta\rho}{\rho}, \quad (11.63)$$

де ρ і ρ_1 – густини частинок і рідини.

Співвідношення між гравітаційними силами і сили в'язкості характеризує *число Галілея*:

$$Ga = \frac{gl^3}{g^2}, \quad (11.64)$$

яке показує співвідношення сил гравітації і сил в'язкості.

Якщо зміна густини рідини спричинена зміною температури, то у цьому випадку критерієм подібності буде *число Грасгофа*:

$$Gr = \frac{l^3}{g^2} g\beta\Delta\tau, \quad (11.65)$$

де β – коефіцієнт об'ємного розширення, який визначається із співвідношення:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta\tau}.$$

Для спільності найменувань доцільно число Грасгофа називати тепловим числом Архімеда.

Гідростатична сила може виникнути й при різниці концентрації домішки у середовищі. У цьому випадку критерієм подібності буде *дифузійне число Архімеда*:

$$Ar_\partial = \frac{l^3}{g^2} g\xi\Delta c, \quad (11.66)$$

де Δc – різниця концентрацій речовини у середовищі і на стінці; ξ – коефіцієнт (аналогічний β), який характеризує відносну зміну густини у залежності від концентрації:

$$\xi = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta c}.$$

Динамічне, теплове і дифузійне числа Архімеда можуть бути одержані з відповідного аналізу рівняння руху у такому вигляді:

$$\rho \frac{dV}{dt} = g\Delta\rho - \rho g\beta\Delta\tau - \rho g\xi\Delta c + \mu\nabla^2 V. \quad (11.67)$$

Після виконання відповідних операцій з рівнянням (2.67) одержимо динамічне число Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha_1 l}{\mu}. \quad (11.68)$$

У тих випадках, коли в рідині великі сили поверхневого натягу, основним критерієм подібності буде **число Вебера**:

$$We = \frac{\rho V^2 l}{\sigma}, \quad (11.69)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Число We виражає собою відношення сил інерції до сил поверхневого натягу. Число We має суттєве значення при вивченні процесів перемішування взаємно нерозчинних рідин. Імовірність дроблення крапель у мішалках визначається у залежності від числа We , представленого у вигляді:

$$We = \frac{\rho n^2 d^3}{\sigma}, \quad (11.70)$$

де n і d – число обертів і діаметр мішалки; σ – міжфазний натяг.

Зі збільшенням числа We діаметр крапель зменшується і міжфазна поверхня росте.

Узагальнення

Легко бачити, що теплове і динамічне числа Пекле за фізичним смислом і формою аналогічні числам Рейнольдса. Отже, можна ввести три **числа Рейнольдса**: динамічне, теплове і дифузійне:

$$\left. \begin{aligned} Re &= \frac{V_0 l}{\vartheta_0}; \\ Re_\tau = Pe &= \frac{V_0 l}{\alpha_\tau}; \\ Re_\partial = Pe_\partial &= \frac{V_0 l}{D}. \end{aligned} \right\} \quad (11.71)$$

У знаменнику цих формул знаходяться відповідно кінематична в'язкість, температуропровідність і коефіцієнт дифузії, тобто величини, які залежать від в'язкості. Тому при зменшенні в'язкості усі числа Рейнольдса будуть рости, а при наближенні величини в'язкості до нуля динамічне, теплове і дифузійне числа Рейнольдса будуть наближатися до нескінченності.

Аналогічно можна одержати динамічне, теплове і дифузійне числа Фур'є.

При вивченні теплових і дифузійних процесів суттєве значення мають **числа Прандтля**, які можна отримати, як відношення відповідних чисел Рейнольдса:

$$\left. \begin{aligned} Pr_{\tau} &= \frac{Re_{\tau}}{Re} = \frac{\vartheta}{\alpha_{\tau}}; \\ Pr_{\partial} &= \frac{Re_{\partial}}{Re} = \frac{\vartheta}{D}; \\ Pr_{зм} &= \frac{Re_{\partial}}{Re_{\tau}} = \frac{\alpha_{\tau}}{D}. \end{aligned} \right\} \quad (11.72)$$

Перше число Прандтля називається тепловим, друге – дифузійним, третє – змішаним.

Перше число Прандтля являє собою відношення кінематичної в'язкості (перенесення імпульсу) і коефіцієнта температуропровідності (перенесення тепла). Таким чином, теплове число Прандтля явно містить тільки величини, що визначають фізичні властивості середовища, тобто характеризують співвідношення поля швидкостей і поля температур. Це значить, такі поля будуть подібні тільки при числі $Pr = 1$.

Аналогічні міркування можна повністю перенести на дифузійне число Прандтля. Воно характеризує співвідношення між полем швидкостей і полем концентрацій. А змішане число Прандтля – відношення температурного поля до поля концентрацій.

На завершення наведемо зведену таблицю чисел подібності процесів переносу кількості руху, тепла і речовини в рідинах і газах [9].

Таблиця 11.1 – Числа подібності процесів переносу.

Число подібності	Прандтля	Архімеда	Нуссельта	Фур'є	Рейнольдса
Динамічне	–	$Ar = gl^3\Delta\rho/\nu^2\rho$	–	$Fu = vt/l^2$	$Re = Vl/\nu$
Теплове	$Pr_\tau = \nu/\alpha_\tau$	$Ar_\tau = gl^3\beta\Delta\tau/\nu^2$	$Nu_\tau = \alpha l/\lambda$	$Fu_\tau = \alpha_\tau/l^2$	$Re_\tau = Vl/\alpha_\tau$
Дифузійне	$Pr_\delta = \nu/D$	$Ar_\delta = gl^3\xi\Delta c/\nu^2$	$Nu_\delta = \alpha_\delta l/D$	$Fu_\delta = Dt/l^2$	$Re_\delta = Vl/D$

ЛЕКЦІЯ 12. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

Наявна структура електричних мереж України є багаторівневою, ієрархічною, розгалуженою [1]. Вона сформована на підставі загального принципу централізації, концентрації та укрупнення виробничих потужностей. Наразі потужності основних агрегатів українських електростанцій та підстанцій та пропускна здатність ліній електропередачі має порядок від десятків до сотень мегаватів, а найбільші генератори атомних електростанцій сягають встановленої потужності в 1000 МВт. З огляду на це українську електроенергетичну систему можна вважати централізованою та нерівномірною з присутністю зосереджених вузлів генерації та передачі електричної енергії. Саме така структура виявилася нестійкою до зовнішніх впливів воєнного характеру. Протягом періоду повномасштабного вторгнення до України країни агресора відбувалося кілька періодів збоїв в роботі об'єднаної енергосистеми України національного масштабу. Ураження критично-важливих об'єктів української енергетики є реально-досяжною метою ворога, що призведе до катастрофічних наслідків та паралічу усіх сфер виробництва та цивільного життя громадян.

З огляду на це **актуальним** стає питання розробки нових принципів побудови конфігурації електричних мереж, яка дозволить значною мірою підвищити стійкість роботи електричних мереж та підвищити рівень енергетичної безпеки усіх її об'єктів. Для цього необхідно розробити нові принципи побудови розгалужених електричних мереж, які дозволять значною мірою підвищити стійкість їх функціонування навіть в умовах воєнних дій.

Отже, **метою** даної роботи є розробка загальних підходів до проектування конфігурації електричних мереж та розробка ідеалізованої моделі електричних мереж підвищеної стійкості до впливів воєнного характеру. .

Загальний підхід. Визначення припущень та обмежень моделі.

За вихідні сучасні умови роботи електричних мереж України приймаємо можливість їх ураження під час спрямованих ракетних обстрілів та засобами безпілотних летальних апаратів, а також шляхом проведення диверсій країною агресором. При цьому вважаємо вказані засоби ураження обмеженими по кількості застосувань з огляду на наявні можливості супротивника та ефективну роботу сил оборони України. Виходячи з цього одним з ефективних засобів протидії цілеспрямованим намаганням знищення української енергетики є застосування принципів розосередження та децентралізації в системах електропостачання. Це призведе до подрібнення і відповідного збільшення кількості цілей для супротивника яка зросте на порядки та зробить безглуздими його намагання знеструмити великі регіони країни та державу в цілому.

Окрім цього до розвитку систем розподіленої генерації нас спонукають й загальні тренди розвитку технологій та суспільства такі як:

- індивідуалізація виробництва, сфери послуг та соціальних структур;
- розвиток альтернативних автономних джерел енергії;
- розвиток систем управління та автоматизації процесу електропостачання;
- продовження тренду на енергоефективне споживання енергетичних ресурсів [2].

Характерними джерелами енергії в мережах з розподіленою генерацією зазвичай є джерела живлення які прийнято називати альтернативними. Для умов України найбільш притаманними джерелами живлення в системах з розподіленою генерацією є сонячні фотоелектричні електростанції, вітроелектростанції, біогазові електростанції та міні і мікро гідроелектростанції.

За принципами розподіленої генерації вироблена електрична енергія споживається максимально близько до місця її генерації, а районні розподільчі та системоутворюючі мережі виконують функцію перенаправлення перетоків надлишкової енергії з однієї частини системи до іншої [3]. Таким чином

мережі високої напруги стають більш розвантаженими та не відіграють ролі основного джерела живлення та основного енергетичного коридора, тому, що ними циркулює лише енергія небалансу між окремими частинами об'єднаної енергетичної системи.

З огляду на те, що генерація електричної енергії в системах з розподіленою генерацією відбувається великою кількістю малопотужних джерел які розміщені територією країни (регіону), базовим елементом системи генерації стає не точка на карті, а площа певної ділянки, яка має власний енергетичний потенціал. Цей потенціал може бути достатнім, недостатнім або надлишковим. Відповідно ця елементарна базова ділянка буде відігравати роль або нейтральної транзитної ланки мережі, або споживача, або джерела енергії. При цьому для кожної конкретної ділянки ця роль може змінюватися в часі відповідно до зміни режиму генерації-споживання електричної енергії.

В системах з розподіленою генерацією основною функцією електричних мереж є не сама передача великих обсягів енергії, а надійний зв'язок усіх елементів мережі. Тому на перший план виходять вимоги до оперативної гнучкості та резервування ліній електропередачі (зв'язку).

Таким чином визначаємо принципові вихідні умови для подальшого моделювання структури та конфігурації розподільчих електричних мереж з розподіленою генерацією-споживанням електричної енергії.

1. Джерела генерації електричної енергії та її споживачі району який розглядається мають розподілений по площі характер.
2. Встановлена потужність джерел енергії кожної ділянки площі має величину яка за сприятливих умов генерації задовольняє або перевищує потреби споживачів електричної енергії даної ділянки.
3. Режим генерації джерел енергії кожної ділянки передбачає певну нестачу енергії за несприятливих умов генерації.
4. Режим роботи електрообладнання кожної ділянки або кількох ділянок може бути порушений з причин воєнного втручання або в наслідок інших аварійних ситуацій погодно-кліматичного та експлуатаційно-технічного характерів.

5. В районі, який розглядається відсутні високопотужні (концентровані) споживачі електричної енергії та її джерела.
6. На етапі моделювання припускаємо, що усі лінії електропередачі виконані проводом однакової марки та перетину.

Моделювання структури та конфігурації електричних мереж системи розподіленої генерації

В роботі пропонується до розгляду фрактально-кластерний принцип побудови електричних мереж в системах з розподіленою генерацією.

Фрактально-кластерні структури характерні для багатьох як природніх так і технологічних складних систем та процесів [4-7].

Відомо, що сучасні електричні мережі мають фрактальні властивості нерегулярного фракталу які впливають на їх характеристики та технологічне середовище[8 - 10].

Завданням фрактально-кластерної структури електричної мережі яка пропонується в даній роботі є:

- забезпечення високої надійності та стійкості мережі до зовнішній впливів воєнного та терористичного характерів;
- уніфікація технологічних рішень та елементів мережі;
- висока оперативна гнучкість та проста логіка оперативних перемикачів в нормальних та нештатних режимах роботи.

В роботі пропонується одна з можливих структур фрактально-кластерних мереж, яка наведена на рис. 1.

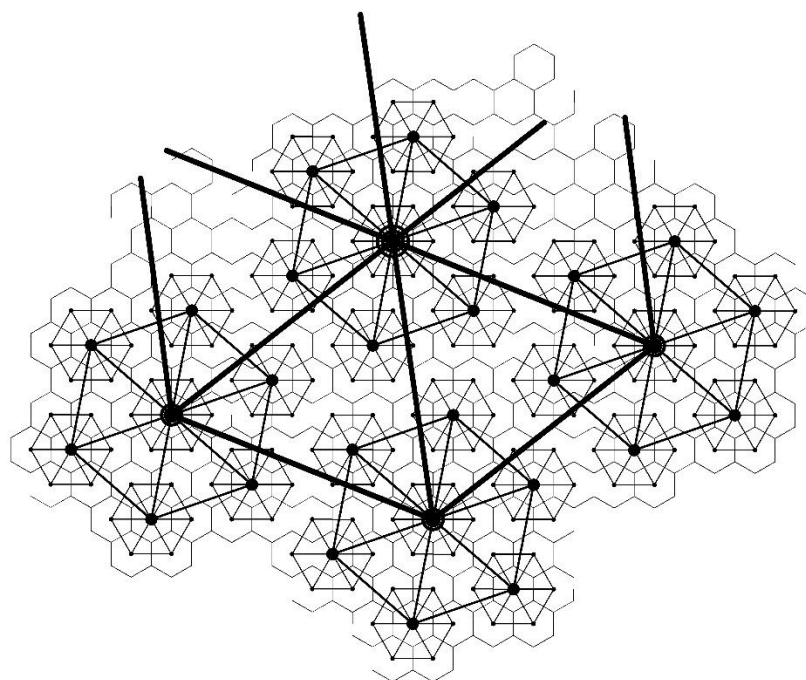
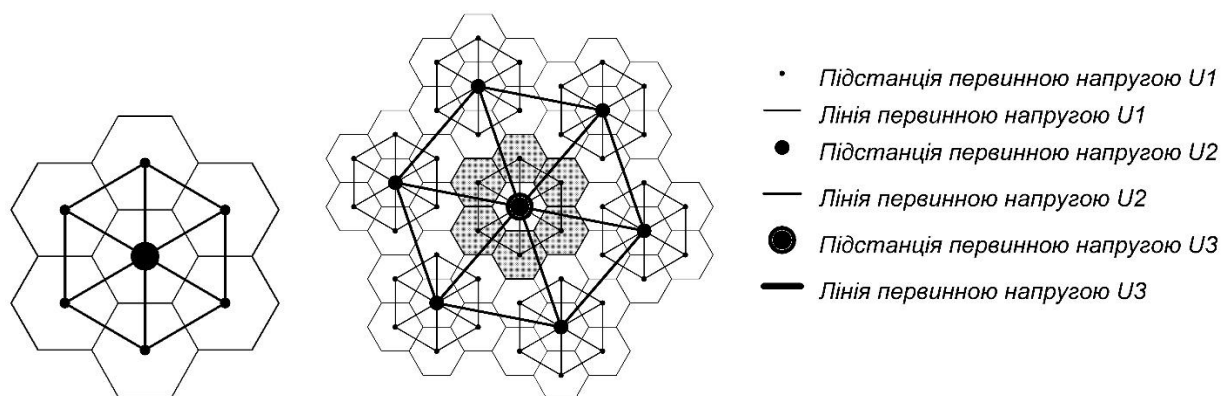


Рис. 1 Фрагмент розгалуженої фрактально-кластерної структури електричних мереж з розподіленою генерацією

Пропонується за базову ділянку площі обрати площу яка обмежена шестикутником. Це обумовлено відомою властивістю сотових структур в яких присутнє оптимальне співвідношення між площею фігури та протяжністю її периметру. Ця властивість дозволить значною мірою оптимізувати витрати провідникового матеріалу для створення вказаної мережі.



б

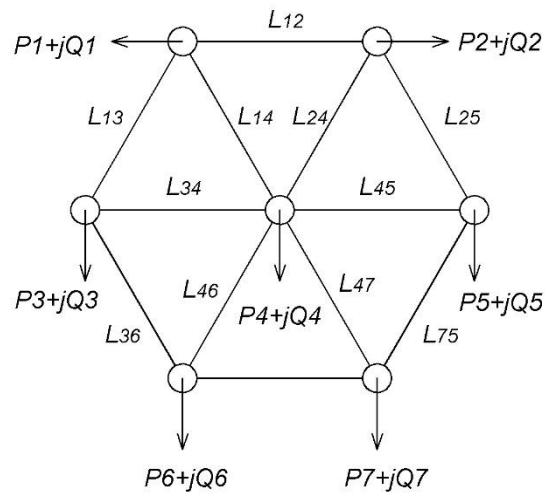
Рис. 12. 2. Фрактально - кластерна структура електричних мереж з розподіленою генерацією

а – базовий кластер структури мережі, б – принцип формування багаторівневої фрактально-кластерної структури

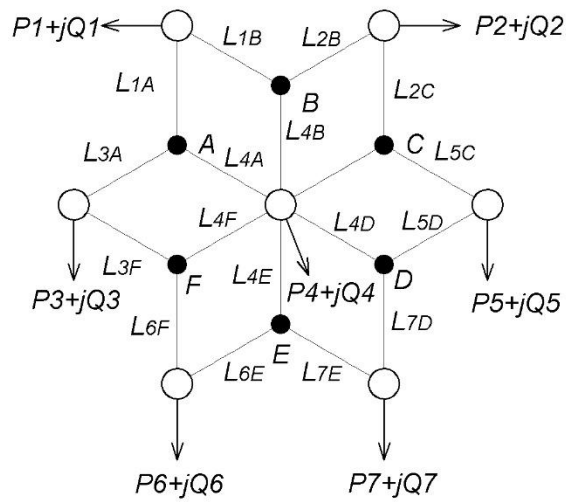
За базовий кластер фрактально-кластерної структури (рис. 2а) в нашому випадку приймаємо структуру, яка складається з сьомих ділянок площі району шестикутної форми які мають точку зв'язку (видачі-прийому електричної енергії) яка розташована в центрі фігури та в реальній ситуації виконує функції розподільчого пристрою. Розподільчі пристрої шістьох ділянок, які межують з границею кластера з'єднані один з одним за кільцевою схемою та радіально приєднані до розподільчого пристрою центральної (сьомої) ділянки. В центрі сьомої ділянки також розташована підстанція яка забезпечує зв'язок між електричною мережею базового кластеру напругою $U1$ та мережами більш високої напруги $U2$ які утворюють фрактал наступної ітерації і так далі (рис. 2б).

Визначення електричної потужності базового кластеру мережі.

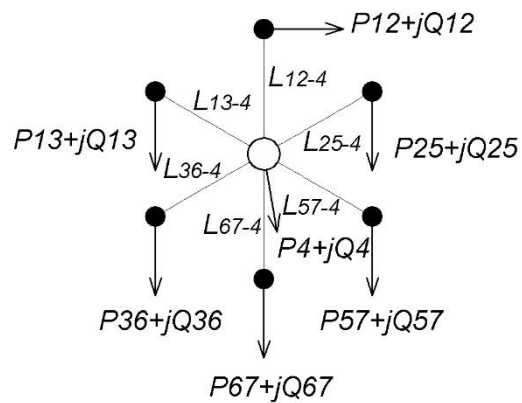
Схема заміщення електричної мережі базового кластеру представлена на рис. 3 а. Вона має сім вузлів які характеризуються величиною електричної потужності вираженої в комплексному вигляді $P+jQ$ яка змінюється в часі і може мати як позитивне (генерація) так і негативне (споживання) значення. Враховуючи, що за умовами моделювання усі проводи мережі кластеру виконані проводом однієї марки та перетину в подальшому параметри опору замінюємо параметрами довжин ділянок ліній електропередачі. Визначимо в загальному вигляді потокорозподіл мережею кластеру та загальну його потужність в точці приєднання до кластеру наступної ітерації. Для цього проведемо послідовне перетворення схеми заміщення мережі базового кластеру. На першому етапі перетворимо «трикутники» між вузлами потужностей у еквівалентні «зірки» на прикладі трикутника 1-3-4 за відомими формулами (1) його сторони L_{13} , L_{14} , L_{34} (рис. 3 а) перетворюються на промені «зірки» L_{1A} , L_{3A} , L_{4A} (рис. 3 б)



a



б



в

Рис. 12.3 Розрахункове перетворення базового кластеру мережі

$$L_{1A} = \frac{L_{13} \cdot L_{14}}{L_{13} + L_{14} + L_{34}};$$

$$L_{3A} = \frac{L_{13} \cdot L_{34}}{L_{13} + L_{14} + L_{34}};$$

$$L_{4A} = \frac{L_{14} \cdot L_{34}}{L_{13} + L_{14} + L_{34}};$$

Враховуючи, що довжина усіх ліній базового кластеру є однаковою можна її прийняти за базове значення та провести обрахунок у загальному вигляді у відносних одиницях. У цьому випадку отримаємо те що усі еквівалентні опори ліній другого етапу перетворення також однакові та втричі менше за еквівалентним значенням опору, а замість дванадцяти ділень еквівалентна схема має вісімнадцять ділень.

Наступним шагом перетворення рознесемо потужності вузлів 1 – 7 по суміжних утворених віртуальних вузлах А,В,С,Д,Е,Ф (центрах «зірок»). Рознесення виконуємо методом зворотних плечей. Враховуючи, що еквівалентна довжина усіх ліній другого етапу перетворення базового кластеру однакова, то потужності вузлів діляться навпіл та розносяться до сусідніх вузлів.

$$S_{13} = \frac{1}{2}(P_1 + P_3) + j \frac{1}{2}(Q_1 + Q_3);$$

$$S_{12} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) + j \frac{1}{2}(Q_1 + Q_2);$$

$$S_{25} = \frac{1}{2}(P_2 + P_5) + j \frac{1}{2}(Q_2 + Q_5);$$

$$S_{57} = \frac{1}{2}(P_5 + P_7) + j \frac{1}{2}(Q_5 + Q_7);$$

$$S_{67} = \frac{1}{2}(P_6 + P_7) + j \frac{1}{2}(Q_6 + Q_7);$$

$$S_{36} = \frac{1}{2}(P_3 + P_6) + j \frac{1}{2}(Q_3 + Q_6);$$

В результаті перетворень отримуємо шестикінецьну еквівалентну зірку (рис. 3 в) сумарний баланс потужності якої знаходимо за першим законом

Кірхгофа, тобто за рахунок алгебраїчного додавання усіх еквівалентних потужностей у вузлі 4 (3).

$$S_{\Sigma} = \sum_{n=7}^1 P + j \sum_{n=7}^1 Q$$

Враховуючи, що у виразах 2 усі активні та реактивні складові потужностей вузлів 1-6, що поділені навпіл зустрічаються по два рази, то можна сказати, що загальний баланс потужності базового кластеру мережі дорівнює алгебраїчній сумі потужностей усіх вузлів. Такий простий алгоритм розрахунку обумовлений симетричною конфігурацією мережі базового кластеру та зберігається на усіх рівнях ітерації фракталу.

Визначення фрактальних властивостей ідеалізованої моделі розподільчої мережі

Запропонована конфігурація ідеалізованої моделі розподільчої мережі має характер регулярного фракталу на кшталт «серветки» Серпинського або «сніжинки» Коха. Визначимо основні співвідношення геометрії простору даного фракталу.

Перш за все визначимо базовий коефіцієнт збільшення довжини ліній електропередачі при переході з фракталу меншої ітерації до фракталу більшої ітерації (рис. 12.4).

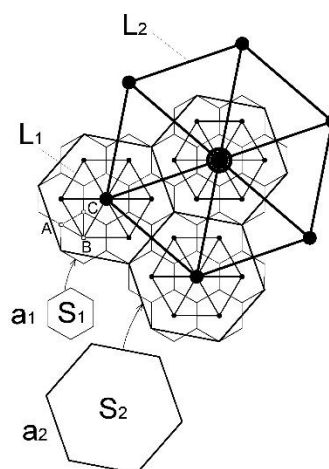


Рис. 4 Визначення геометричних співвідношень фрактальної структури мережі

В запропонованій структурі мережі за елементарну основу беремо шестикутник площі електрифікованого району з довжиною сторони a_1 та відповідною площею S_1 , яка визначається як

$$S_1 = \frac{3a_1^2\sqrt{3}}{2}.$$

При цьому уніфікована довжина лінії електропередачі фракталу першої ітерації L_1 дорівнює двом висотам трикутника ABC (як елемента базового шестикутника зі стороною a_1) та дорівнює

$$L_1 = 2 \frac{a_1\sqrt{3}}{2} = a_1 \cdot \sqrt{3}.$$

При переході до фракталу другої ітерації елементарною основою площі стає шестикутник зі стороною a_2 та площею S_2 яка дорівнює

$$S_2 = 7S_1$$

так як елементарна основа площі фракталу другої ітерації охоплює сім елементарних основ площі попереднього фракталу першої ітерації (рис.5).

Знаючи площу S_2 аналогічно формулі (4) можна вивести значення для сторони a_2 виражене через a_1 та S_1 як

$$a_2 = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}} 7S_1} = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}} 7 \frac{3a_1^2\sqrt{3}}{2}} = \sqrt{7} \cdot a_1$$

при цьому аналогічно формулі (5)

$$L_2 = 2 \frac{a_2\sqrt{3}}{2} = a_2 \cdot \sqrt{3}$$

а вважаючи, що $a_2 = \sqrt{7} \cdot a_1$ визначаємо подібне співвідношення між L_1 та L_2 як

$$L_2 = \sqrt{7} \cdot L_1.$$

Таким чином показник $\sqrt{7}$ є природнім масштабом фрактальної структури електричної мережі, яка розглядається. Він відображає основні характерні властивості фракталів такі як самоподібність та масштабна інваріантність. Кожна наступна ітерація даного фракталу збільшує довжину уніфікованих ліній електропередачі у $\sqrt{7}$ разів.

Визначимо загальну протяжність ліній електропередачі для кожної ітерації фракталу. Очевидно, що сумарна протяжність ліній електропередачі базового кластеру першої ітерації напругою U_1 дорівнює $12L_1$ або $12\sqrt{3} a_1$. Ця протяжність ліній формує розподільчу мережу первинної низької напруги U_1 на площі району базового кластеру. На другій ступені ітерації площа кластеру збільшується у 7 разів, і відповідно загальна протяжність низьковольтних ліній електропередачі напругою U_1 сімох базових кластерів, які утворюють загальну площу району кластеру другої ітерації зростає у 7 разів. При цьому з'являється мережа напругою U_2 яка формує мережу кластеру другої ітерації подібну до мережі базового кластеру. Її протяжність визначається як $12L_2$ або $12\sqrt{3} a_2$ або $12\sqrt{3} \sqrt{7} a_1$ або $12\sqrt{21} a_1$.

Сумарна протяжність розподільчих мереж напругою U_1 та U_2 разом кластеру другої ітерації фракталу, що розглядається буде дорівнювати

$$7 \times 12\sqrt{3} a_1 + 12\sqrt{21} a_1$$

а для фракталу третьої ітерації

$$7 \times (7 \times 12\sqrt{3} a_1 + 12\sqrt{21} a_1) + 12\sqrt{147} a_1$$

і так далі.

Тобто якщо сумарну протяжність ліній електропередачі фракталу кожної ітерації визначити як $\sum L_i$, то в узагальненому вигляді формула розрахунку загальної протяжності електричних мереж які побудовані за фрактально-кластерним принципом та вказаною структурою буде мати вигляд

$$\sum L_{i=n} = 7 \sum L_{i=n-1} + 12L_n$$

Питому протяжність ліній електропередачі мережі відносно площі району визначаємо як

$$L_{num} = \frac{\sum L_{i=n}}{S_n}$$

де S_n – площа району мережі ітерації фракталу n , км².

Отже можемо зробити висновок про те, що:

1. Базовим елементом для подальшої побудови конфігурації даної ідеалізованої моделі є правильний шестикутник шестикутника площі електрифікованого району зі стороною a_1 . Він використовується як основа форми кластерів усіх ітерацій. Через його лінійний розмір можна обрахувати усі інші лінійні розміри даної фрактальної структури.
2. Природнім просторовим масштабом фракталу, що розглядається по збільшенню лінійних розмірів є величина $\sqrt{7}$, а по збільшенню площі є масштаб 7.
3. При збільшенні кількості ітерацій фракталу складність простору збільшується нелінійно, що відбивається на зміні фрактальної розмірності даної структури

Очевидно, що з кожною наступною ітерацією фракталу мережі її просторова складність буде зростати за рахунок додавання елементів ліній електропередачі все більшої і більшої напруги, а відповідно буде зростати і питома протяжність ліній електропередачі. Проте ступінь цього зростання з кожною наступною ітерацією буде зменшуватися. Це чітко видно по результатах розрахунків (табл. 1)

Визначення номенклатури номінальних напруг електричних розподільчих мереж за рівнем ітерації

Запропонована модель електричної мережі має кілька ітерацій. При цьому кожна ітерація фракталу повинна мати свою номінальну напругу. Номінальна напруга електричних мереж залежить від потужності яка передається лінією електропередачі та відстані на яку треба передати вказану потужність. Є кілька методик визначення можливих номінальних напруг електричних мереж. У даній роботі скористаємось емпіричною розрахунковою формулою Ілларіонова згідно якої оптимальна напруга дорівнює

$$U_{opt} = \frac{1000}{\sqrt{500 / L + 2500 / P}},$$

де L - довжина уніфікованої лінії, км;

P - передана активна потужність, МВт.

Використання саме цього (розрахункового) методу визначення номінальної напруги для ітерацій фракталу мережі обумовлено ідеалізацією моделі та розрахунково-теоретичним характером дослідження.

Лінійні розміри ділянок мережі L обраховуються так як наведено вище, а передана активна потужність обраховується за питомим показником P_{nut} (МВт/км²). У даній роботі візьмемо цей показник як середнє значення потужності генерованої українськими електростанціями усіх типів у 2013 році (194377 млн.кВт год) приведену до площі країни (603628 км²) та із значенням кількості годин використання максимуму встановленої потужності 84560 годин (тобто віртуальне 100% завантаження одиниці площі). Таким чином

$$P_{nut} = \frac{194377}{8760 \cdot 603628} = 0,0368 MBm / км^2$$

Такі дані відображатимуть природній режим роботи економіки та відповідно енергетики України напередодні воєнної агресії з боку країни агресора. Таким чином в роботі моделюється режим максимального завантаження розподільчих електричних мереж, які працюють у режимі передавання повної потужності споживачів/генераторів від/до кластеру потужності, хоча насправді в мережах з розподіленою генерацією згенерована електрична енергія споживається переважно у місці її генерації, а у розподільчу мережу потрапляють переважно перетоки небалансу. Виходячи з цього визначені значення будуть моделювати самий напружений режим роботи електричної мережі, що моделюється.

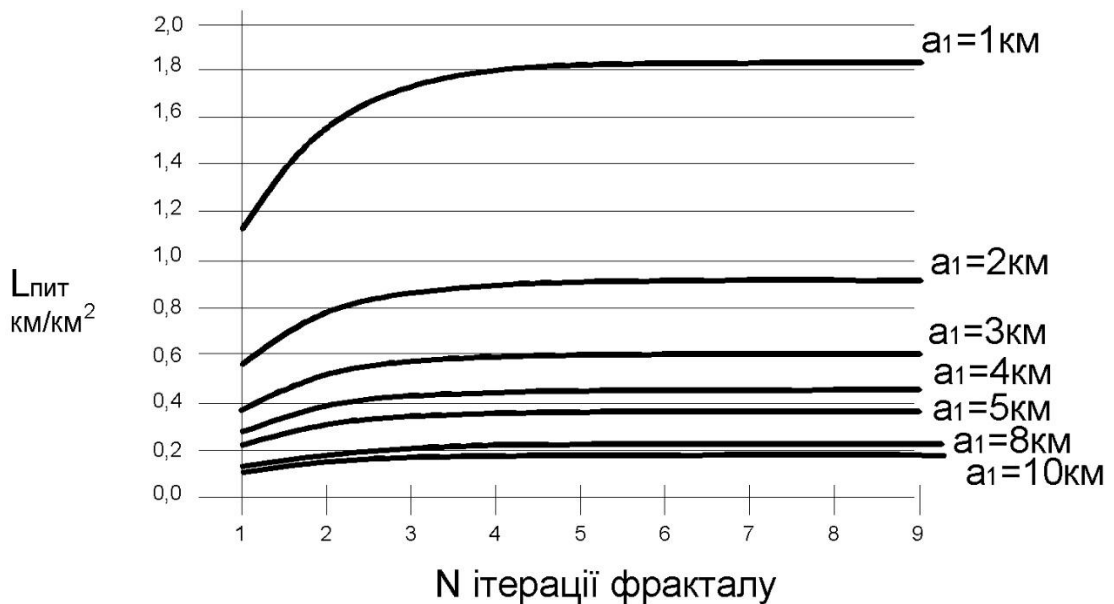
Розрахунок показників ідеалізованої моделі

Розрахунок проводимо за допомогою програмного середовища таблиць Excel. Результати розрахунків наведено у таблиці 1 та на рисунку 5.

Таблиця 1. Результати розрахунку показників ідеалізованої моделі

N ітерації фракталу	Рпит	a	Sел	Скл	L1	P	Uопт	Сума L	Lпит
	МВт/км2	км	км2	км2	км	МВт	кВ	км	км/км2
1	0,0368	1,00	2,60	18,17	1,73	0,10	6,15	20,76	1,1429
2	0,0368	2,65	18,17	127,18	4,58	0,67	16,12	200,25	1,5746
3	0,0368	7,00	127,20	890,42	12,11	4,68	41,69	1547,10	1,7375
4	0,0368	18,53	890,59	6234,11	32,05	32,77	104,32	11214,32	1,7989
5	0,0368	49,02	6235,28	43646,97	84,80	229,46	244,04	79517,84	1,8218
6	0,0368	129,70	43655,18	305586,24	224,39	1606,51	514,04	559317,53	1,8303
7	0,0368	343,19	305643,69	2139505,86	593,72	11247,69	969,27	3922347,44	1,8333
8	0,0368	908,09	2139908,09	14979356,61	1571,00	78748,62	1690,27	27475283,99	1,8342
9	0,0368	2402,81	14982172,73	104875209,12	4156,85	551343,96	2830,49	192376870,21	1,8343

У таблиці 1 наведено результати розрахунку показників ідеалізованої моделі електричної мережі фрактально-кластерного типу для дев'яти ітерацій фракталу базового кластеру із стороною a_1 елементарного шестикутника, яка дорівнює 1 км. На шостій ступені ітерації площа кластеру $S_{кл}$ стає співвідносною з територією України, а на сьомій ступені вже перевищує її. Тому для практичних розрахунків ці позиції є граничними по своїй доцільності, проте обрахунок восьмої та дев'ятої ступені ітерації дає розуміння загальної динаміки зміни питомої довжини ліній електропередачі $L_{пит}$, яка після сьомої ітерації майже не змінюється, що свідчить про нелінійний характер зміни складності простору, що є характерним для фрактальних структур. Цю залежність наведено на рисунку 5. Залежності побудовані для фракталів з різними первинними геометричними розмірами елементарного базового шестикутника зі стороною від 1 до 10 км. На великих первинних лінійних розмірах елементарного шестикутника питома довжина ліній електропередачі майже залишається незмінною в залежності від масштабу фракталу і номеру його ітерації.



Питома протяжність ліній електропередавання оператору розподілу електроенергії в Харківській області АТ «Харківобленерго» складала станом на 2010 рік 40419 км повітряних ліній електропередачі та 6095 км кабельних ліній. При цьому площа Харківської області становить 31,4 тис.км². Тобто на номіналах напруги від 6 до 110 кВ питома протяжність ліній електропередачі наявних електричних мереж Харківської області становить не менш ніж 1,48 км/км². Таким чином питома довжина ліній електропередачі при реалізації запропонованої ідеалізованої моделі збільшеться не суттєво. А враховуючи, що усі лінії електропередачі в даній моделі є одноланцюговими, то майже зовсім не змінеться.

Що до оптимальних напруг характерних ітерацій фракталу, то вони, згідно розрахунків, мають сім рекомендованих ступенів від 6 кВ до 970 кВ, що є технічно можливим для реалізації. В таблиці 2 наведені розрахункові дані відповідних обчислень для фрактально-кластерної структури електричної мережі з різними первинними геометричними розмірами елементарного базового шестикутника зі стороною від 1 до 10 км. З таблиці видно, що зі збільшенням лінійних розмірів базового шестикутника кількість ітерацій фракталу мережі буде зменшуватися з причини недоцільності технічної реалізації з таких причин як надвисокі напруги (понад 1000кВ) та недостатня

щільність та розгалуженість мережі. Найблище наближеним варіантом лінійки номінальних напруг запропонованої моделі мережі до існуючої лінійки номінальних напруг високовольтних мереж України є варіанти з лінійними розмірами сторони базового шестикутника 1,2 та 3 км.

Таблиця 12. 2. Оптимальні напруги мереж різних ітерацій

N ітерації фракталу	a1, км						
	1	2	3	4	5	8	10
	U опт, кВ						
1	6,15	12,23	18,24	24,19	30,08	47,40	58,65
2	16,12	31,79	47,04	61,90	76,38	117,79	143,87
3	41,69	80,54	116,96	151,27	183,75	272,12	324,98
4	104,32	192,91	270,41	339,66	402,54	564,15	656,12
5	244,04	419,89	561,13	681,21	786,88	1049,87	1196,46
6	514,04	815,63	1045,03	1236,23	1403,16	1817,12	2048,11
7	969,27	1448,46	1809,50	2110,87	2374,77	3032,52	3401,35
8	1690,27	2446,52	3020,37	3501,74	3924,62	4982,61	5577,60
9	2830,49	4039,78	4963,02	5739,72	6423,20	8136,20	9100,82

Розробка схемних рішень електричної мережі, яка моделюється

Оперативна гнучкість та надійність електричної мережі визначається перш за все запровадженнями схемними рішеннями. В конфігурації мереж, яка запропонована вище можливо застосувати єдину уніфіковану схему підстанцій з трьома приєднаннями ліній електропередачі та двома приєднаннями силових трансформаторів (рис. 6). Така схема дозволить реалізувати конфігурацію з кільцевим транзитним підключенням підстанцій кола та їх приєднанням до центральної підстанції кластеру. В запропонованій схемі використовується чотири високовольтні вимикача на п'ять приєднань, що є достатньо економічним варіантом. У порівнянні з типовою схемою транзитної підстанції за схемою містка на одне додаткове приєднання додається лише один вимикач. Така схема характерна для розподільчих пристроїв 330 – 750 кВ які збираються за схемою «3/2» або «4/3». Як і вказані

схеми, запропонована схема має простий та зрозумілий алгоритм оперативних перемикачів. Кожне приєднання захищене одразу двома вимикачами які забезпечують високу селективність захисту та локалізують будь яку аварію лише на тій ділянці на якій вона відбулася. Також вивід в ремонт будь якої частини схеми підстанції здійснюється за однаковим алгоритмом переключень, що зменшує вірогідність помилкових дій оперативного персоналу та прискорює час реагування на зміну штатних режимів роботи та в аварійних режимах. Також приєднання підстанції за трьома лініями значною мірою підвищує надійність її роботи.

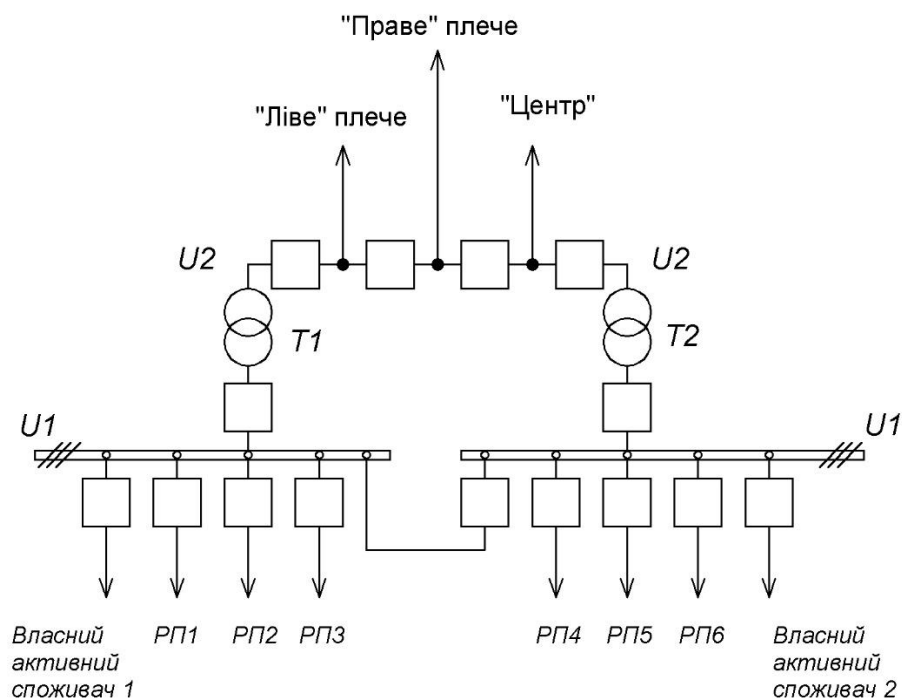


Рис. 12.6 Схема первинних з'єднань уніфікованої підстанції

На рис. 12.7 наведена електрична принципова схема з'єднань підстанцій базового кластеру мережі, яка моделюється в роботі. Відповідно до неї мережа базового кластеру має шість уніфікованих підстанцій *ПС1 – ПС6* з напругами *U1* та *U2* зібраних по схемі з рис.3 та вузлову підстанцію *ПС7* яка має три рівні

напруги ($U1, U2, U3$) та забезпечує з'єднання базового кластеру з фракталом наступної ітерації з більш високим рівнем напруги $U3$. При цьому частина вузлової підстанції ПС7 напругою від $U1$ до $U2$ виконана за схемою «два блоки з ремонтною перемичкою», що спрощує та здешевлює цю частину, а розподільчий пристрій високої напруги $U3$ виконаний за уніфікованою схемою з рис.6 яка пропонується в даній роботі. Цей розподільчий пристрій вже є елементом фракталу наступної ітерації та повторює схемні рішення на більш високому рівні напруги. Така самоподібність є характерною для фрактальних структур.

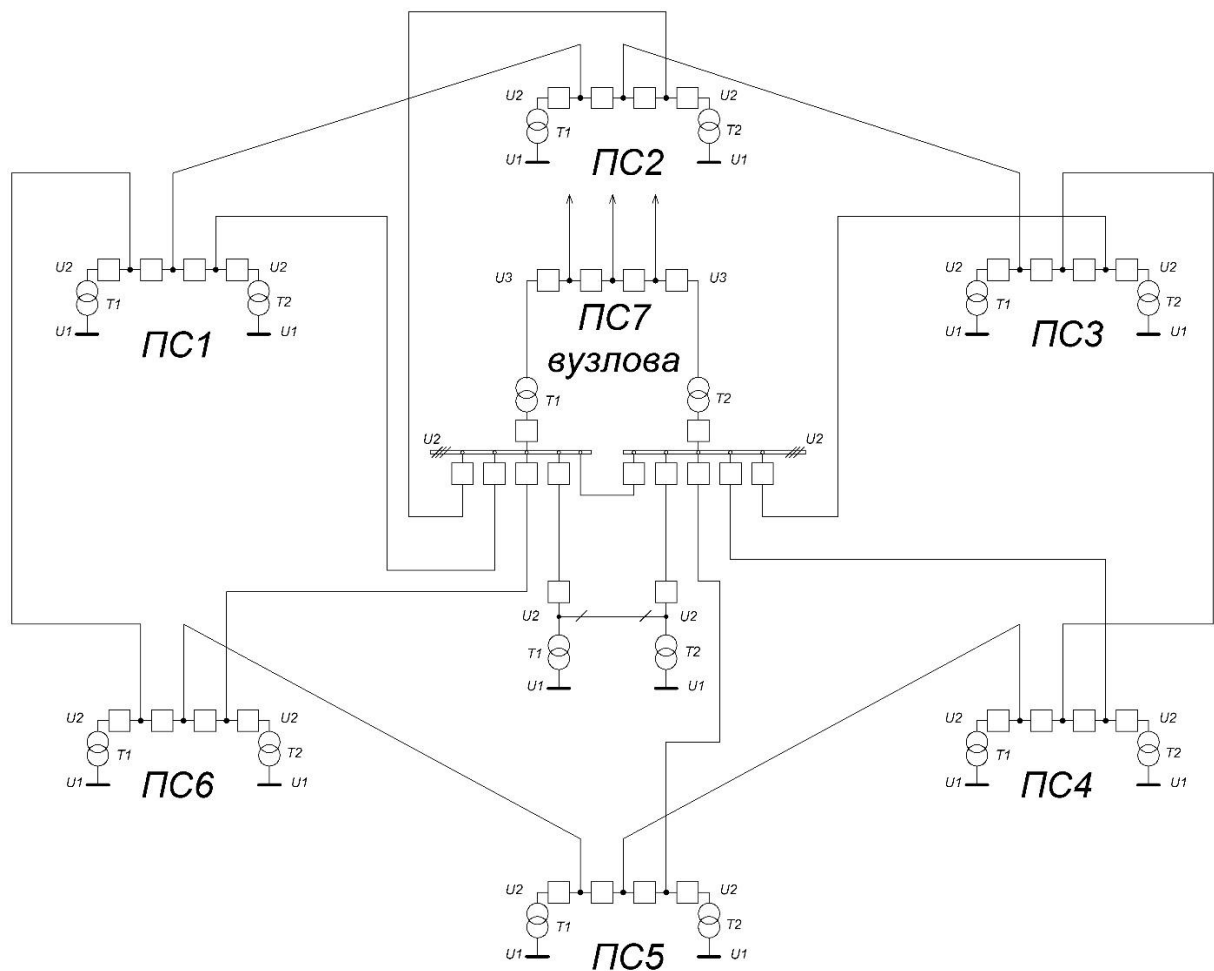


Рис. 12.7 Схема електрична принципова мережі базового кластеру

Запропонована модель електричної мережі є ідеалізованою та призначена для подальшої адаптації до реальних умов. Цю адаптацію передбачено

проводити за рахунок реконструкції існуючих електричних мереж таким чином, щоб вони набували фрактальних ознак та переваг ідеалізованої моделі.

Наведена ідеалізована модель відображає загальні принципи побудови конфігурації електричних мереж які можуть бути реалізовані для самого широкого спектру параметрів елементів електричних мереж таких як навантаження, величина генерації електричної енергії, протяжність ліній електропередачі, перетин проводів, тощо.

Напрямки подальших досліджень

До перспективних напрямків подальших досліджень відносяться:

1. Розробка нових та вдосконалення існуючої ідеалізованої моделі електричної мережі.
2. Дослідження фрактально-кластерних властивостей реально існуючих електричних мереж. Визначення їх характерних показників, таких як фрактальна розмірність, просторовий масштаб, властивості самоподібності, тощо.
3. Визначення впливу фрактально-кластерних властивостей електричних мереж на їх техніко-економічні показники
4. Встановлення кореляційних зв'язків між ідеалізованими моделями та реальними електричними мережами.
5. Розробка алгоритмів розрахунку параметрів режимів роботи запропонованою моделі за реальних умов експлуатації.
6. Визначення техніко-економічних показників роботи запропонованої ідеалізованої моделі мережі за реальних умов експлуатації (визначення показників надійності, економічності, безпеки, тощо)
7. Аналіз та вдосконалення схемних рішень моделей мереж та визначення їх техніко-економічних показників.

ЛЕКЦІЯ 13. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА СИСТЕМ

У процесі експлуатації електроенергетичної системи відбувається постійна зміна таких її характеристик, як частота змінного струму, напруги у вузлових точках електричної мережі, струми і потоки потужностей на ділянках схеми, потужності генерації джерел та споживання навантажень та інші показники, які характеризують процеси перетворення, передавання та розподілу електричної енергії. Моделювання усталених режимів електроенергетичних систем складають більшу частину розрахунків як під час експлуатації та управління, так і під час проектування розвитку електроенергетичних систем. Метою такого моделювання є визначення допустимості режимів напруги у вузлах схеми електричної мережі, перетоків потужності в окремих лініях або групах ліній контрольованого перерізу, перевірка можливості передачі заданої потужності, оцінювання сумарних втрат потужності тощо. Моделювання усталених режимів є, як правило, найважливішою складовою вирішення комплексних завдань, таких, наприклад, як вибір експлуатаційних схем електричної системи, регулювання режиму напруги, перерозподіл перетоків потужності в неоднорідних електричних мережах; аналіз статичної та динамічної стійкості електричної системи по відношенню до зовнішніх несприятливих збурень; визначення струмів короткого замикання; розрахунок протікання електромеханічних і тривалих перехідних процесів та багатьох інших задач. Моделювання усталених режимів електроенергетичних систем виконують на базі розрахункових математичних моделей. Останні характеризуються двома основними складовими — топологічною моделлю робочої схеми електричної системи і алгебраїчною моделлю усталеного режиму її роботи. Топологічна модель схеми характеризує послідовність з'єднання елементів, їх параметри і властивості та може бути представлена у вигляді схем заміщення та розрахункових схем електричної мережі. Алгебраїчна модель режиму

електричної системи містить сукупність рівнянь, які визначають аналітичну залежність між параметрами розрахункової схеми і характеристиками режиму електроенергетичної системи. Розв'язання задачі моделювання усталеного режиму електроенергетичної системи передбачає визначення таких показників її стану:

- для всіх вузлів — активної та реактивної потужностей, або струмів навантажень споживачів та джерел електричної енергії; модулів та фазових кутів векторів напруги;

- для всіх ділянок — струмів, потоків потужностей, втрат активної та реактивної потужностей від передавання електричної енергії;

- для всієї системи в цілому — сумарних втрат потужностей та усталеної частоти змінного струму. Зазначений перелік режимних параметрів електроенергетичної системи має властивість надмірності. Так, наприклад, якщо відомий режим напруги у вузлах схеми електричної мережі можна, за законом Ома, визначити струми на ділянках схеми, потоки потужностей на початку та наприкінці кожної ділянки, втрати потужностей на ділянках і, зрештою, сумарні втрати потужності в електроенергетичній системі. Інакше, сумарні втрати потужностей в системі можна визначити як різницю між сумарною потужністю усіх джерел живлення системи і сумарною потужністю всіх споживачів. Класична задача моделювання усталеного режиму електроенергетичної системи передбачає використання як вихідні данні інформації про навантаження споживачів у вузлах розрахункової схеми. Мета розв'язання задачі полягає у визначенні режиму напруги у вузлах схеми, струмів, потоків потужності і втрат потужності на ділянках, а також сумарних втрат потужності. Для розв'язання деяких практичних задач, пов'язаних з моделюванням режиму електроенергетичної системи, визначення всієї сукупності перелічених параметрів не є необхідним і обов'язковим. Так, наприклад, для налаштування уставок пристроїв максимального струмового захисту ліній електропередавання, достатній лише розрахунок струму в

контрольованому перерізі. У загальному випадку режими електроенергетичних систем є несиметричними і несинусоїдними. Для розрахунку характеристик таких режимів здійснюють перетворення системи фазних координат струмів і напруг електричної системи в систему координат симетричних складових. Несинусоїдні криві струмів розкладають у ряди Фур'є і розглядають гармонійні складові змінного струму, які характеризуються частотами, кратними промислової частоті 50 Гц. Тоді для кожної з гармонійних складових складають розрахункову схему і реалізують послідовне моделювання режиму прямої, зворотної та нульової послідовностей. Симетричний синусоїдний режим є окремим випадком, фактично являючи собою режим прямої послідовності основної гармоніки. У загальному випадку, задача моделювання усталених режимів електроенергетичних систем складається з послідовного виконання наступних основних процедур.

1. Вибір елементів електроенергетичної системи, які визначають характеристики режиму та формування для кожного з них відповідної математичної моделі.

2. Визначення способу з'єднання елементів електричних мереж та складання розрахункової схеми електричної системи.

3. Вибір розрахункової моделі усталеного режиму електроенергетичної системи та формування систем алгебраїчних рівнянь, які пов'язують параметри розрахункової схеми з режимними параметрами електроенергетичної системи.

4. Вибір і реалізація математичного апарату для розв'язання систем рівнянь усталеного режиму електроенергетичної системи. Математичне моделювання усталеного режиму електроенергетичної системи можна розглядати як розв'язання задачі відображення усталеного режиму з багатовимірного простору відомих режимних параметрів в простір шуканих. Наприклад, у класичній постановці задачі визначення режимних параметрів вузлів навантаження, зазвичай, задають потужностями навантажень. В

результаті розв'язання задачі визначення режимних параметрів для таких вузлів необхідно визначити модулі і фазові кути векторів напруги, тобто здійснити перетворення системи координат режиму з простору вузлових потужностей в простір вузлових напруг. В основу математичного моделювання усталених режимів електроенергетичних систем покладено їх основну властивість, яка полягає в одночасності протікання процесів виробництва, передачі, розподілу та споживання електричної енергії. Тобто, в кожен, як завгодно малий проміжок часу, в електроенергетичній системі повинен суворо дотримуватися баланс між виробництвом і споживанням (включаючи втрати на передачу і розподіл) електричної енергії. Це означає, що сумарна потужність генерації всіх електростанцій системи в кожен момент часу завжди дорівнює сумі потужностей навантажень і втрат потужності в системі

$$\Sigma \dot{S}_g = \Sigma \dot{S}_n + \Delta \dot{S}_\Sigma$$

де ΣS_g — сумарна потужність джерел живлення (генераторів) електроенергетичної системи;

ΣS_n — сумарна потужність споживачів електричної енергії;

ΔS_Σ — сумарні втрати потужності на передавання та розподіл електричної енергії. Закон збереження енергії в електричній системі формалізується законами Ома і Кірхгофа, на підставі яких формують розрахункові моделі усталених режимів. Закон Ома визначає взаємну залежність між потенціальною (напруга) та кінетичною (струм) формами електричної енергії. Відомо, що спад напруги на ділянці електричного кола визначається виразом

$$\Delta u = ri,$$

де $\Delta u, i$ — миттєві значення спаду напруги та струму на ділянці електричного кола;

r — активний опір ділянки. Для електричних систем змінного струму використовують запис закону Ома в комплексній формі.

$$\Delta \dot{U} = \underline{z} \dot{I} = (r + j(x_L - x_C)) \dot{I},$$

де z , r , x_L , x_C — повний, активний, індуктивний та ємнісний опори відповідно. При чому $1/LC = \omega^2$, $\omega = 2\pi f$ — кругова частота змінного струму; f — частота змінного струму. Зворотнє перетворення має вигляд

$$\dot{I} = \frac{\Delta \dot{U}}{\underline{z}} = \Delta \dot{U} \underline{y},$$

де $\underline{y} = 1/\underline{z}$ — повна комплексна провідність ділянки електричного кола. Перший закон Кірхгофа визначається принципом безперервності електричного струму та являє собою закон збереження енергії для вузлових точок розрахункової схеми електричної системи. Для електричної системи змінного струму перший закон Кірхгофа записують у вигляді

$$\sum_{k \in s} \dot{I}_k = \dot{J}_s,$$

де $\dot{I}_k$ — вектор струму k -ї ділянки розрахункової схеми, суміжної з s -м пунктом схеми; запис $k \in s$ під знаком суми означає, що підсумовування слід здійснювати за всіма ділянками, суміжними з s -м пунктом; $\dot{J}_s$ — вектор вузлового струму навантаження s -го пункту розрахункової схеми. Перший закон Кірхгофа можна записати також у формі потужностей. Для цього складові виразу можна помножити на спряжений комплекс напруги поточного вузла схеми

$$\hat{U}_s \sum_{k \in s} \dot{I}_k = \sum_{k \in s} \dot{S}_k = \dot{S}_{ns} = \hat{U}_s \dot{J}_s,$$

де $\dot{S}_k$ — потік потужності k -ї ділянки розрахункової схеми з боку s -го пункту; $\dot{S}_{ns}$ — потужність навантаження s -го пункту схеми. Другий закон Кірхгофа формалізує закон збереження енергії в замкнених контурах

електричних кіл. Для електричних систем змінного струму другий закон Кірхгофа записують у комплексній формі

$$\sum_{k=1}^n \Delta \dot{U}_k = \sum_{k=1}^n \dot{E}_k,$$

де ΔU — спади напруги на k -й ділянці контуру;

$E_k I$ — е.р.с., яка діє на k -й ділянці схеми.

Таким чином, в задачах моделювання режимів електричну систему можна розглядати як електричне коло, яке підпорядковується законам Ома і Кірхгофа. Разом з тим існує ряд особливостей, які виділяють задачі моделювання режимів електричних систем із загального класу розрахунків електричних кіл. До таких особливостей слід віднести:

1) подання трифазних електричних систем змінного струму за допомогою однолінійних розрахункових схем прямої, а у разі необхідності — додатково зворотної та нульової послідовностей;

2) використання землі як зворотного проводу для організації замкненого електричного кола передавання енергії;

3) подання джерел живлення та споживачів електричної енергії нелінійними (рідше — лінійними) джерелами струму та напруги.

До теперішнього часу накопичений багатий досвід математичного моделювання усталених режимів електроенергетичних систем будь-якого ступеню складності, замкнутості і неоднорідності, представлений широким спектром різноманітних підходів до формування та реалізації розрахункових моделей електроенергетичних систем. Тут слід розрізняти розрахункові моделі усталених режимів електричних систем та розрахункові методи реалізації цих моделей, їх класифікація представлена на рис. 13.1. Розрахункові моделі, які використовують для аналізу режимів електроенергетичних систем поділяють на два класи, відповідно до того закону Кірхгофа, який покладають до основи формування моделі. Так, використання рівнянь першого закону Кірхгофа призводить до формування вузлової розрахункової моделі. Розрахункова модель, побудована на базі

другого закону Кірхгофа, отримала назву контурної моделі. Відповідно до способу постановки режимної задачі, розрахункові моделі усталених режимів електричних систем поділяють на прямі та обернені.

В прямих розрахункових моделях передбачено безпосереднє використання рівнянь розрахункових моделей для визначення параметрів усталених режимів. Так, рівняння вузлової розрахункової моделі дозволяють безпосередньо визначити вузлові струми або вузлові потужності незалежних вузлів розрахункової схеми. В обернених розрахункових моделях для визначення режимних параметрів необхідно провести певні перетворення відповідних рівнянь. Так, розв'язання систем алгебраїчних рівнянь вузлової моделі, що, звісно, передбачає перетворення цих рівнянь, дозволяє визначити режим напруги в незалежних вузлах розрахункової схеми електричної системи.

Кожна з представлених розрахункових моделей може бути безпосередньо використана для визначення параметрів усталених режимів електроенергетичної системи. Разом з тим, математичні рівняння моделей служать основою для формування розрахункових методів, які передбачають або перетворення вихідних рівнянь, або ті чи інші попередні зміни розрахункової схеми. Загалом такі методи базуються на математичному апараті алгебри матриць та елементах теорії графів. При цьому розрізняють три основні групи математичних методів.

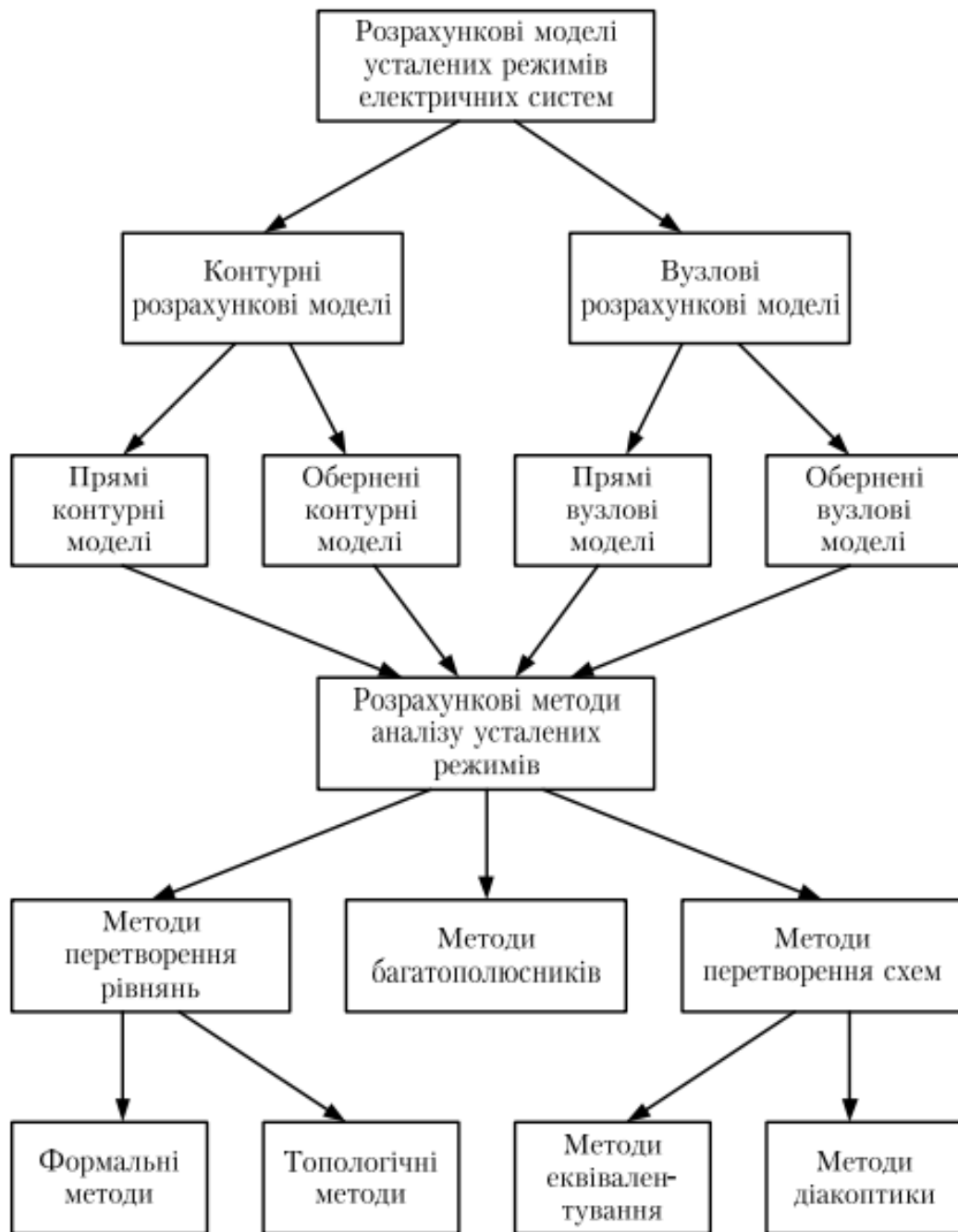


Рис. 13.1. Класифікація розрахункових моделей усталених режимів електричних систем

1. Методи, пов'язані з перетворенням рівнянь усталених режимів: - формальні; - здійснювані з урахуванням топологічних та інших особливостей електричної мережі.

2. Методи на базі математичного апарату теорії багатополюсників.

3. Методи, пов'язані з перетворенням розрахункової схеми електричної мережі: - шляхом еквівалентування частини схеми. Тут розрахункова схема електроенергетичної системи або її частина спрощується перед виконанням розрахунків таким чином, щоб кількість елементів зменшилась, але таке спрощення не вплинуло б на режимні параметри досліджуваної системи; - шляхом поділу розрахункової схеми на підсистеми. Тут розрахунок ведеться на основі декількох груп рівнянь, частина з яких моделює режими окремих виділених частин системи (підсистем), а частина характеризує взаємний зв'язок цих підсистем. Крім розглянутого підходу до класифікації розрахункових моделей усталених режимів електроенергетичних систем, останні можна класифікувати і за іншими ознаками. Так, наприклад, топологічні властивості електричних мереж енергосистем дозволяють визначити розрахункові моделі розімкнутих і замкнутих схем. Зазначимо, що такий поділ методів моделювання усталених режимів є доволі умовним. Дійсно, розрахункова модель усталеного режиму розімкнутої схеми входить як складова контурної моделі замкнутої мережі і її можна розглядати як окремий випадок контурної моделі усталеного режиму електричної мережі, яка не містить жодного замкнутого контуру. Водночас, вузлову розрахункову модель можна з успіхом застосувати до розв'язання задач аналізу усталених режимів розімкнених схем. Також можна здійснити класифікацію розрахункових моделей та методів аналізу усталених режимів електроенергетичних систем за формою систем алгебраїчних рівнянь. Тут розрізняють лінійні, нелінійні та лінеаризовані розрахункові моделі. До лінійних відносять розрахункові моделі електроенергетичних систем, в яких електричні навантаження представлені фіксованими значеннями струмів. До нелінійних відносять розрахункові моделі електроенергетичних систем, в яких електричні навантаження представлені фіксованими значеннями активних і реактивних потужностей, або за допомогою статичних характеристик навантаження по напрузі, а також системи, в яких електричні станції моделюють фіксованими значеннями модуля вектора напруги та активної

потужності. До лінеаризованих відносять розрахункові моделі нелінійних електричних систем, в яких електричні навантаження представляють фіксованими значеннями активних і реактивних потужностей (нелінійні джерела струму), ²⁴ але на кожному етапі обчислень умовно заміщують струмами (лінійні джерела струму). За побудовою процесу моделювання усталених режимів розрізняють прямі та ітераційні методи розрахунків. Прямі методи дозволяють визначити точні значення режимних параметрів після скінченої кількості математичних операцій. Ітераційні методи є наближеними, тут режимні параметри обчислюють в результаті багатокрокового процесу поступового уточнення, а результат розрахунку можна дістати тільки з певним ступенем точності. Точний розв'язок при використанні ітераційних методів можна теоретично інтерпретувати як результат нескінченного ітераційного процесу. Очевидно, що прямі розрахункові методи, здебільшого, використовують для реалізації лінійних розрахункових моделей усталених режимів, а для реалізації нелінійних моделей — використовують ітераційні методи. Проте, такий поділ моделей та методів є досить умовним. Відомо, наприклад, що для розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь можна застосовувати ітераційні методи, наприклад, метод Зейделя. Водночас, точні безітераційні методи часто використовують і під час ітераційного розв'язання систем нелінійних алгебраїчних рівнянь, наприклад, методами лінеаризації, або під час використання методу Ньютона, а для моделювання усталених режимів найпростіших електричних систем можна залучати прямі методи розв'язання нелінійних алгебраїчних рівнянь — квадратних та біквадратних. Через специфічні особливості систем алгебраїчних рівнянь, за допомогою яких моделюють усталені режими електроенергетичних систем, найбільшого поширення дістали саме ітераційні методи розрахунку.

ЛЕКЦІЯ 14. ЗАСОБИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Моделювання параметричних полів навантажень і течії флюїдів у пристроях за допомогою ресурсу SolidWorks.

SolidWorks — продукт компанії SolidWorks Corporation (зараз — дочірня компанія Dassault Systèmes), САПР, інженерного аналізу та підготовки виробництва будь-якої складності та призначення.

SolidWorks є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу згідно з концепцією CALS — технологій, включаючи двонаправлений обмін даними з іншими Windows-застосунками та створення інтерактивної документації.

В залежності від класу задач, що розв'язуються, замовникам пропонується три базових конфігурації системи: SolidWorks, SolidWorks Professional та SolidWorks Premium.

Завдання, які вирішуються:

Конструкторська підготовка виробництва:

- 3D проектування виробів (деталей і зборок) будь-якого ступеня складності з урахуванням специфіки виготовлення.
- Створення конструкторської документації.
- Промисловий дизайн.
- Проектування комунікацій (електроджгутів, трубопроводи тощо.).
- Інженерний аналіз (міцність, стійкість, теплопередача, частотний аналіз, динаміка механізмів, газо / гідродинаміка, оптика і світлотехніка, електромагнітні розрахунки, аналіз розмірних ланцюгів і ін.).
- Експрес-аналіз технологічності на етапі проектування.

Технологічна підготовка виробництва:

- Проектування оснащення і інших засобів технологічного оснащення.
- Аналіз технологічності конструкції виробу.

- Аналіз технологічності процесів виготовлення (лиття пластмас, аналіз процесів штампування, витяжки, гнуття та ін.).
- Розробка технологічних процесів.
- Матеріальне та трудове нормування.
- Механообробка: розробка керуючих програм для верстатів з ЧПУ, верифікація УП, імітація роботи верстата. Фрезерна, токарна, токарно-фрезерна і електроерозійна обробка, лазерна, плазмова і гідроабразивна різання, вирубні штампи, координатно-вимірювальні машини.
- Управління даними і процесами на етапі ТПП.

Управління даними і процесами:

- Робота з єдиною цифровою моделлю виробу.
- Електронний технічний і розпорядчий документообіг.
- Технології колективної розробки.
- Робота територіально-розподілених команд.
- Ведення архіву технічної документації.
- Проектне управління.
- Захист даних.
- Підготовка даних для ERP, розрахунків собівартості.

SolidWorks є конструкторською системою твердотілого параметричного моделювання машинобудівних конструкцій спеціально розробленою для використання на персональних комп'ютерах під управлінням операційної системи Windows. Стандартний графічний користувальницький інтерфейс Windows і засоби твердотілого параметричного моделювання дозволяють швидко і легко створювати тривимірні моделі деталей, складальні одиниці, генерувати креслення, значно знижуючи терміни проектування і зменшуючи час виходу виробів на ринок.

SolidWorks Motion призначений для розрахунку руху механізмів. Модуль використовує інформацію, що міститься в збірках SolidWorks з можливістю уточнення розрахункової моделі за допомогою його процедур.

SolidWorks Motion є третім, найбільш функціональним інструментом SolidWorks, для імітації руху. Перші два рівні: рух збірки і фізичне моделювання, присутні в базовій конфігурації SolidWorks Standard, можуть бути використані для створення кінематичної моделі збірки, імітації руху без отримання чисельних характеристик. Після цього інформація без будь-яких додаткових дій сприймається на рівні SolidWorks Motion.

SolidWorks Routing - модуль проектування трубопроводів. Часто при проектуванні приладів і обладнання виникає завдання створення трубопроводів і комунікацій, які б об'єднали компоненти збірок і зробили тривимірну модель завершеною. Включення трубопровідної обв'язки в тривимірну модель виробу дозволяє вирішити багато проблем уже на етапі проектування і уникнути ситуації, коли на етапі монтажу виявляється, що труби неправильно зігнуті і заважають роботі інших систем або в існуючій конструкції недостатньо вільного місця для прокладки всіх необхідних комунікацій.

Завдання створення тривимірних моделей трубопроводів виникає при проектуванні приладів і обладнання різних галузей машинобудування, при створенні гідравлічних і пневматичних систем, в нафтогазовій промисловості при створенні трубопровідної обв'язки, а також при проектуванні різних інженерних комунікацій, підводок і шлангів.

Бібліотеки стандартних виробів **Toolbox SolidWorks** використовуються для забезпечення автоматичного сполучення стандартних виробів при вставці в збірку та надають можливість групових операцій. Toolbox дозволяє проводити проектувальні розрахунки балок і підшипників. Бібліотеки Toolbox редагуються і налаштовуються під конкретні завдання будь-якого підприємства.

SolidWorks Simulation (COSMOSWorks) – універсальний інструмент для аналізу методом кінцевих елементів. SolidWorks Simulation існує в трьох конфігураціях: власне SolidWorks Simulation, SolidWorks Simulation Professional та SolidWorks Simulation Premium. Однак, навіть в мінімальній

конфігурації модуля міцнісного аналізу забезпечується повноцінний статичний аналіз, як деталі, так і збірки з використанням кінцевих елементів твердого тіла, поверхонь і балок. Реалізовано різноманітні контактні умови і всілякі віртуальні з'єднувачі.

Модуль SolidWorks Simulation дозволяє проводити інженерні розрахунки і моделювати різних впливи навколишнього середовища на виріб.

Основними особливостями SolidWorks Simulation є:

- лінійний аналіз;
- втомний аналіз металу;
- нелінійний аналіз;
- теплової аналіз;
- частотний аналіз;
- аналіз виробів з пластмаси і гуми;
- динамічний аналіз і ін.

Лінійний аналіз напружень дозволяє Solidworks-дизайнерам і інженерам швидко і ефективно перевірити якість, продуктивність і безпеку ще при створенні їх дизайну.

Лінійний аналіз напружень за допомогою SolidWorks Simulation може бути невід'ємною частиною процесу розробки, що знижує потребу в дорогих прототипах, виключає доопрацювання і затримки, а також економить часу і витрати на розробку. За допомогою такого аналізу можливо обчислювати напруги і деформації геометрії, такі як:

- деталь або збірка під навантаженням, яка деформується з невеликими поворотами і переміщеннями;
- статичні навантаження виробу (не враховуючи інерції) і постійні навантаження;
- матеріал під постійною напругою деформації (закон Гука).

Моделювання методом аналізу кінцевих елементів (FEA) – це дискретизація проєктованих компонентів в тверде тіло, оболонку або балковий елемент, що використовує лінійний аналіз напружень для

визначення реакції деталей і вузлів під впливом: - сили; - тиску; - прискорення; - температури. - контакт між компонентами.

Для проведення аналізу напружень, повинні бути відомими дані матеріалів компонентів. Стандартна база даних **SolidWorks CAD** попередньо завантажена матеріалами, які можуть бути використані **SolidWorks Simulation**.

Моделювання методом скінченних елементів використовується для розрахунку переміщень компонентів, деформацій і напружень при внутрішніх і зовнішніх навантаженнях. Геометрія при аналізі дискретизується у використання тетраедричних (3D), трикутних (2D) і балкові елементів.

Так як промислові компоненти виконуються переважно з металу, аналіз металевих компонентів може бути виконано за допомогою лінійного або нелінійного аналізу напружень. Аналіз неметалічних компонентів (наприклад, пластмаси або гумових деталей) повинен здійснюватися з використанням методів нелінійного аналізу напружень, через їх складний взаємозв'язок деформації і навантаження.

SolidWorks Flow Simulation Electronic Cooling Module Add-In – додатковий модуль для теплового розрахунку електронних пристроїв. Він включає розширену базу даних по віртуальних вентиляторах, матеріалах електротехнічного призначення, термоелектричних охолоджувачах (елементи Пельтьє). Модуль забезпечує імітацію проходження постійного струму та нагріву ним, теплових трубок, багатошарових друкованих плат.

SolidWorks Flow Simulation HVAC Module Add-In – додатковий модуль **SolidWorks Flow Simulation** для розрахунку систем вентиляції, опалення та кондиціонування. Він включає: розширену базу даних по будівельних матеріалах і вентиляторах; уточнену модель теплообміну випромінювання з урахуванням відображення, заломлення і спектральних характеристик; розрахунок параметрів комфорту – середньої прогнозованої оцінки, середньої температури і ін.

SolidWorks Flow Simulation є модулем гідрогазодинамічного аналізу в середовищі **SolidWorks**. Для модуля Flow Simulation немає різниці між геометричними сутностями, створеними в SolidWorks або імпортованими в базовий модуль. Забезпечується підтримка для 64-розрядних операційних систем з доступом до всієї доступної оперативної пам'яті. Також використовується багатопроцесорність при вирішенні.

Модуль Flow Simulation програмного середовища SolidWorks дає можливість моделювання процесів:

- стаціонарні і нестаціонарні течії;
- стискувані і нестискувані (рідини або гази) течії, включаючи до-, транс- і надзвукові режими;
- ідеальні і реальні гази;
- неньютонівські рідини;
- одно і багатокомпонентні течії без хімічних взаємодій і розділення фаз;
- спільні розрахунки течії рідини або газу та теплопередачі всередині твердого тіла без наявності границі розділення газ – рідина;
- ламінарні і турбулентні течії, враховуючи ламінарний/турбулентний перехід;
- «заморожування» течій для розділення «швидких» і «повільних» процесів;
- течії в пористих середовищах з урахуванням теплопровідності стінок;
- урахування шорсткості стінок;
- зовнішні і/або внутрішні течії;
- конвекційний теплообмін, вільна, вимушена або змішана конвекція;
- радіаційний теплообмін з управлінням прозорістю стінок і розділенням властивостей стінок для теплообміну випромінюванням і сонячною радіацією;
- розрахунок траєкторій твердих частинок і крапель в потоці та ін.

Початковими і граничними умовами можуть задаватися наступні вихідні параметри:

- швидкість, тиск (статичний, динамічний, оточуючого середовища), масові та об'ємні витрати;
- температура, концентрація компонентів, параметри турбулентності;
- витратно-напірні характеристики віртуальних вентиляторів;
- різноманітні типи стінок, включаючи шорсткість, коефіцієнт тепловіддачі і параметри умовного середовища на стінках, що не межують з реальним текучим середовищем;
- джерела тепла (об'ємні і поверхневі), віртуальні тепло вентилятори;
- можливості вказати залежність граничних умов та параметрів від часу та координат;
- симетрія відносно базових площин і періодична симетрія.

Управління обчислювальними операціями виконуються безпосередньо по згенерованій розрахунковій сітці моделі SolidWorks, що створюється автоматично в області твердого тіла. Сітка адаптується в залежності від геометричних характеристик моделі і поля вирішення.

Результати дослідів виводяться у вікні SolidWorks. Існує можливість виводу функції на будь-якій площині у вигляді кольорових епюр, векторів та ізоліній, відображення результатів за допомогою ізоповерхонь.

За результатами розрахунків можна створювати трирівневі траєкторії; виводити характеристики розрахунків, розподіл будь-якої характеристикою вздовж будь-якої кривої в MS Excel.

1.1. Методика побудови 3D-моделей конструкцій та їх елементів

3D-моделювання – це процес розробки математичного представлення будь-якої тривимірної поверхні об'єкта за допомогою спеціалізованого ПЗ.

Продукт моделювання є 3D-модель. Вона може бути представлена у вигляді програмного коду або відображена як 3D-модель, а також за допомогою двовимірного зображення, що створюється за допомогою

процесу рендерингу (візуалізації). 3D-моделі можуть створюватись вручну або автоматично.

3D-моделювання застосовується в ряді різноманітних областей, а саме:

- промисловість;
- міське планування;
- архітектура і дизайн;
- реклама і маркетинг;
- комп'ютерні ігри;
- кінематографія;
- анімація.

Сучасну промисловість неможливо уявити без моделювання продукції до виробництва. З появою 3D-технології виробники отримали можливість значної економії матеріалів і зменшення фінансових витрат на інженерне проектування. За допомогою 3D-моделювання дизайнери-графіки створюють тривимірні зображення деталей і об'єктів, які в подальшому можна використовувати для створення прес-форм і прототипів об'єкта.

Тривимірна графіка дозволяє детальніше відобразити всю сутність моделі, особливості побудови і її роботи до найдрібніших деталей. Вона поєднує в собі прийоми і інструменти, необхідні для створення об'ємних об'єктів в тривимірному просторі.

Під прийомами варто розуміти способи формування тривимірного графічного об'єкта – розрахунок його параметрів, креслення «скелета» або об'ємною не деталізовані форми; видавлювання, нарощування і вирізання деталей і т.д.

А під інструментами – професійні програми для 3D-моделювання. В першу чергу – ***SolidWork, ProEngineering, 3DMAX***, а також деякі інші програми для об'ємної візуалізації предметів і простору.

SolidWorks (SolidWorks Corporation) застосовується для дизайну, деталізації та візуалізації продуктів, систем, машин та оснащення. Всі версії

включають моделювання, збірки, малювання, sheetmetal, зварювані деталі та freeform surfacing functionality. Він також підтримує Visual Basic та C.

ProEngineering – система автоматизованого проектування, інженерного аналізу та підготовки виготовлення виробів будь-якої складності і призначення. ProEngineering є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу відповідно до концепції CALS-технологій(Continuous Acquisition and Life cycle Support), включаючи двонаправлений обмін даними з іншими Windows-додатками і створення інтерактивної документації. ProEngineering Enterprise SE (Standard Edition) – повний інструментальний пакет, що забезпечує комплексне рішення задач розробки виробу і точно відповідає сучасним вимогам глобально розподілених виробничо-конструкторських груп.

3DMAX у своєму розпорядженні має засоби для створення різноманітних за формою і складністю тривимірних комп'ютерних моделей, реальних чи фантастичних об'єктів навколишнього світу, з використанням різноманітних технік і механізмів, включаючи полігональне моделювання, в яке входять Editable mesh (редагована поверхня) і Editable poly (редагований полігон). Це найпоширеніший метод моделювання, який використовується для створення складних моделей і низькополігональних моделей для ігор.

SketchUp Pro (Trimble) – програма для моделювання, що підтримує 2D та 3D моделі. Безкоштовна версія також доступна та інтегрована в Google Earth. SketchUp – програма для моделювання відносно простих трьох-вимірних об'єктів – будівель, меблів, інтер'єру. Основною особливістю цієї програми є майже повна відсутність вікон попередніх налаштувань. Всі геометричні характеристики під час або зразу після закінчення дії інструменту задаються з клавіатури в поле Value Control Box (поле контролю параметрів), яке знаходиться в правому нижньому кутку робочої області, справа від напису Measurements (панель вимірів). Ще одною ключовою особливістю є інструмент Push/Pull («Тягни/Штовхай»), завдяки якому будь-яку площину

можна «втягнути» в сторону, створивши по мірі її руху нові бокові стінки. Рухати площину можна в притик до наперед заданої кривої, для цього служить спеціальний інструмент Follow Me («Ведення»).

AutoCAD – дво- і тривимірна система автоматизованого проектування і креслення, що включає в себе повний набір інструментів для комплексного тривимірного моделювання (підтримується твердотільне, поверхневе і полігональне моделювання). AutoCAD дозволяє отримати високоякісну візуалізацію моделей за допомогою рендеринга mental ray. Також в програмі реалізовано управління тривимірним друком (результат моделювання можна відправити на 3D-принтер) і підтримка хмар точок (дозволяє працювати з результатами 3D-сканування). Тим не менш, слід зазначити, що відсутність тривимірної параметризації не дозволяє AutoCAD безпосередньо конкурувати з машинобудівними САПР, такими як Inventor, SolidWorks та іншими.

ЛЕКЦІЯ 15. ЛАБОРАТОРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Сутність, мета, функції наукового експерименту

Найбільш важливою складовою частиною наукового дослідження є **експеримент** (лат. *experimentum* – проба, дослід) – метод емпіричного дослідження, що базується на активному та цілеспрямованому втручанні суб'єкта у процес наукового пізнання явищ та предметів реальної дійсності шляхом створення умов, що контролюються та управляються, які дозволяють встановлювати визначені якості та закономірні зв'язки в об'єкті, що досліджується, та багатократно їх відтворювати.

Експеримент широко застосовують не лише в природничих науках, а й у соціальній практиці, де він відіграє значну роль у пізнанні та управлінні суспільними процесами.

Від звичайного, щоденного, пасивного спостереження активний експеримент відрізняється активним впливом дослідника на явище, що вивчається.

Основною метою експерименту є виявлення властивостей досліджуваних об'єктів, підтвердження наукових гіпотез і на цій основі більш широке та поглиблене вивчення теми наукового дослідження.

Проведення експериментальних досліджень передбачає здійснення ряду **пізнавальних операцій**:

- визначення цілей експерименту на основі існуючих теоретичних концепцій з урахуванням потреб практики та розвитку самої науки;
- теоретичне обґрунтування умов експерименту;
- розроблення основних принципів, створення технічних засобів для проведення експерименту;
- спостереження, вимірювання та фіксація виявлених у ході експерименту властивостей, зв'язків, тенденцій розвитку досліджуваного

об'єкта;

- статистична обробка результатів експерименту;
- попередня класифікація та порівняння статистичних даних.

Які переваги має експеримент порівняно із спостереженням та іншими методами емпіричного рівня наукового пізнання?

Експеримент дає можливість досліджувати, по-перше, об'єкти в так званому чистому вигляді; по-друге, в екстремальних умовах, що сприяє більш глибокому проникненню в їхню сутність; по-третє, важливою перевагою експерименту є його повторюваність.

Класифікація експериментів

1 За призначенням об'єкта експерименту: природничо-наукові (хімічні, біологічні, фізичні), виробничі, педагогічні, соціологічні, економічні тощо.

2 За характером зовнішніх впливів на об'єкт дослідження: речовинні, енергетичні, інформаційні.

Речовинний експеримент передбачає вивчення впливу різних речовинних факторів на стан об'єкта дослідження, наприклад, вплив різних домішок на якість сталі.

Енергетичний експеримент використовується для вивчення впливу різних видів енергії(електромагнітної, механічної, теплової тощо) на об'єкт дослідження.

Інформаційний експеримент використовується для вивчення впливу інформації на об'єкт дослідження.

3 За характером об'єктів та явищ, що вивчаються в експерименті: техніко-технологічні, соціометричні тощо.

Техніко-технологічний експеримент спрямований на вивчення

елементів технологічного процесу (продукції, обладнання, діяльності робітників тощо) або процесу в цілому.

Соціометричний експеримент використовується для вимірювання існуючих міжособистісних соціально-психологічних відносин у малих групах з метою їх подальшої зміни.

4 За структурою об'єктів та явищ, що вивчаються в експерименті: прості та складні

Простий експеримент використовується для вивчення простих об'єктів, які мають у своєму складі невелику кількість взаємозв'язаних та взаємодіючих елементів, що виконують прості функції.

У складному експерименті вивчаються явища або об'єкти з розгалуженою структурою та великою кількістю взаємозв'язаних та взаємодіючих елементів, що виконують складні функції.

5 За способом формування умов проведення експерименту: природні та штучні.

Природні експерименти характерні для біологічних, соціальних, педагогічних, психологічних наук, наприклад, при вивченні соціальних явищ (соціальний експеримент) в обставинах, наприклад, виробництва, побуту тощо.

Штучні експерименти широко використовуються в багатьох природничо-наукових або технічних дослідженнях. У цьому випадку вивчаються явища, що ізольовані до потрібного стану, для того щоб оцінити їх в кількісному та якісному відношеннях.

6 За організацією проведення експерименту: лабораторні, стендові, полігонні, натурні, польові, виробничі, відкриті або закриті тощо.

Лабораторні, стендові дослідження проводять з використанням типових приладів, спеціальних моделюючих установок, стендів, обладнання тощо.

Натурний експеримент проводиться в природних умовах та на реальних об'єктах. Залежно від місця проведення натурні експерименти поділяють на виробничі, польові, полігонні тощо.

Експерименти можуть бути **відкритими та закритими**. Такі типи експериментів значно поширені в психології, соціології, педагогіці. У відкритому експерименті його завдання відкрито пояснюються тим, хто досліджується, у закритому – для одержання об'єктивних даних завдання експерименту приховуються.

7 За характером взаємодії засобу експериментального дослідження з об'єктом дослідження: звичайні та модельні.

Звичайний (класичний) експеримент включає експериментатора, об'єкт або предмет експериментального дослідження та засоби, за допомогою яких проводиться експеримент.

Модельний експеримент базується на використанні як об'єкта, що досліджується, моделі, яка може не тільки заміщувати в дослідженні реальний об'єкт, але і умови, в яких він вивчається.

8 За типом моделей, що досліджуються в експерименті: матеріальні та розумові.

Матеріальний експеримент є формою об'єктивного матеріального зв'язку свідомості з зовнішнім світом. У матеріальному експерименті використовуються матеріальні об'єкти дослідження.

Розумовий (ідеалізований, уявний) експеримент є однією з форм розумової діяльності суб'єкта, у процесі якої в його уяві відтворюється структура реального експерименту, тобто засобами розумового експерименту є розумові моделі (чуттєві образи, образно-знакові моделі, знакові моделі).

9 За величинами, що контролюються в експерименті: пасивні та активні.

Пасивний експеримент передбачає вимірювання тільки вибраних показників (параметрів, змінних) в результаті спостереження за об'єктом без втручання в його функціонування.

Активний експеримент пов'язаний з вибором спеціальних вхідних сигналів (факторів) та контролює вхід та вихід системи, що досліджується.

10 За числом факторів, що варіюються в експерименті:
однофакторні та багатфакторні.

Однофакторний експеримент передбачає: виділення необхідних факторів; стабілізацію факторів, що заважають; почергове варіювання факторів, що цікавлять дослідника.

Стратегія **багатфакторного експерименту** полягає в тому, що варіюються всі змінні відразу, і кожний ефект оцінюється за результатами всіх дослідів, що були проведені в даній серії досліджень.

11 За метою дослідження: *перетворюючі, констатуючі, контролюючі, пошукові, вирішальні.*

Перетворюючий (творчий) експеримент включає активну зміну структури та функцій об'єкта дослідження у відповідності до висунутої гіпотези, формування нових зв'язків та відносин між компонентами об'єкта або між досліджуваним об'єктом та іншими об'єктами.

Констатуючий експеримент використовується для перевірки відповідних передбачень. У процесі такого експерименту констатується наявність визначеного зв'язку між впливом на об'єкт дослідження та результатом (функцією відгуку).

Контролюючий експеримент зводиться до контролю за результатами зовнішніх впливів на об'єкт дослідження з урахуванням його стану, характеру впливу та ефекту, що очікується.

Іноді виникає необхідність провести **пошукові експериментальні**

дослідження. Вони необхідні в тому випадку, якщо виникають труднощі в класифікації всіх факторів, що впливають на явище, яке вивчається внаслідок відсутності достатньої кількості попередніх даних.

Вирішальний експеримент ставиться для перевірки справедливості основних положень фундаментальних теорій у тому випадку, коли дві або декілька гіпотез однаково узгоджуються з багатьма явищами. Така узгодженість призводить до труднощів у визначеності правильності гіпотез. Вирішальний експеримент відповідає на питання «так чи ні?».

Методологія експериментальних досліджень

Методологія експерименту – це загальна структура (методика) експерименту, тобто постановка та послідовність виконання експериментальних досліджень.

Експеримент включає такі **основні етапи**:

- 1) розроблення плану – програми експерименту;
- 2) оцінку вимірювання та вибір засобів для проведення експерименту;
- 3) проведення експерименту;
- 4) обробку та аналіз експериментальних даних.

Наведена кількість етапів характерна для традиційного експерименту. Разом з цим останнім часом широко використовують математичну теорію експерименту, яка дозволяє значно підвищити точність та зменшити обсяг експериментальних досліджень.

У цьому випадку експеримент включає такі етапи: розроблення плану – програми експерименту; оцінку вимірювання та вибір засобів для проведення експерименту; математичне планування експерименту з одночасним проведенням експериментального дослідження, обробкою

та аналізом одержаних даних.

Зупинимося дещо детальніше на окремих етапах експериментального дослідження.

Розроблення плану-програми експерименту.

План-програма включає найменування теми дослідження, робочу гіпотезу, методику експерименту, план створення експериментальної ситуації, перелік необхідних матеріалів, приладів, установок, список виконавців експерименту, календарний план робіт і кошторис витрат на виконання експерименту. В ряді випадків до плану-програми включають роботи з конструювання та виготовлення приладів, апаратів, пристроїв, їх методичне обстеження, а також програми дослідних робіт на підприємствах.

Одним з найбільш важливих етапів складання плану-програми є визначення ***мети і завдань експерименту***. Чітко обґрунтовані завдання – це вагомий внесок у їх вирішення. Кількість завдань повинне бути невеликим. Для конкретного (не комплексного) експерименту оптимальна кількість завдань 3 – 4. У великому комплексному експерименті їх може бути 8 – 10.

Основа плану-програми – ***методика проведення експерименту***. В методиці детально проектують процес проведення експерименту. Спочатку складають послідовність (черговість) проведення операцій вимірювань та спостережень.

Потім ретельно описують кожну операцію окремо з урахуванням вибраних засобів для проведення експерименту. Особливу увагу приділяють методам контролю якості операцій, які повинні забезпечувати при мінімальній(раніше встановленій) кількості вимірів високу надійність та задану точність. Розробляють форми журналів для запису результатів вимірів та спостережень.

Важливим розділом методики є вибір методів обробки та аналізу експериментальних даних. Обробка даних зводиться до систематизації всіх цифр, класифікації, аналізу. Результати експериментів повинні бути зведені до таких форм запису – таблиць, графіків, формул, номограм, які дозволяють швидко та доброякісно співвідносити одержані результати.

Особливу увагу в методиці повинно бути приділено математичним методам обробки та аналізу одержаних дослідних даних – встановленню емпіричних залежностей, апроксимації зв'язків між варіативними характеристиками, встановленню критеріїв тощо.

Після розроблення методики визначають **обсяг та трудомісткість експериментальних досліджень**, які залежать від глибини теоретичних розробок, ступеня точності прийнятих засобів вимірювання. Чим чіткіше сформульована теоретична частина дослідження, тим менший обсяг експерименту. На обсяг та трудомісткість експерименту істотно впливає і вид експерименту.

Після встановлення обсягу експериментальних робіт складають перелік необхідних засобів вимірювання, матеріалів, список виконавців, календарний план та кошторис витрат.

Не менш важливим є неодмінне розроблення в рамках плану-програми експериментального дослідження, так званого плану створення експериментальної ситуації.

Експериментальна ситуація – це сукупність умов, за яких проводиться експеримент. План створення експериментальної ситуації завжди пов'язаний не лише з завданнями, методикою, але і з конкретним об'єктом, на якому потрібно вирішувати поставлені завдання та реалізовувати саму методику.

На завершення план-програму експериментального дослідження розглядає науковий керівник, обговорюють в науковому колективі та

затверджують в установленому порядку.

Оцінка вимірювання та вибір засобів для проведення експерименту. Обґрунтування засобів вимірювання – це вибір необхідних для спостережень та вимірювань приладів, обладнання, машин, апаратів тощо. Засоби вимірювання можуть бути вибрані стандартні або за їх відсутності виготовлені самостійно.

Дуже відповідальною частиною є встановлення точності вимірів та похибок. Методи вимірювання повинні базуватися на законах спеціальної науки – метрології.

Проведення експерименту. Проведення експерименту є найважливішим та трудомістким етапом. Експериментальні дослідження необхідно проводити у відповідності до затвердженого плану-програми і особливо методики експерименту. Розпочинаючи експеримент, остаточно уточнюють методику його проведення, послідовність випробувань.

Обробка та аналіз експериментальних даних. Завершується експеримент переходом від емпіричного вивчення до обробки отриманих даних, логічних узагальнень, аналізу і теоретичної інтерпретації отриманого фактичного матеріалу.

Загальні вимоги до проведення експерименту

При проведенні експерименту потрібно дотримуватися таких загальних вимог:

- об'єкт дослідження повинен допускати можливість опису системи змінних, що визначають його функціонування;
- потрібно мати можливість проведення якісних та кількісних вимірів факторів, які впливають на об'єкт дослідження, зміну його стану

або поведінки під час експерименту;

- опис об'єкта експериментального дослідження потрібно проводити в системі його складових;
- потрібне обов'язкове визначення та опис умов існування об'єкта дослідження (галузь, тип виробництва, умови праці тощо);
- потрібно мати чітко сформульовану експериментальну гіпотезу про наявність причинно-наслідкових зв'язків;
- необхідне предметне визначення понять сформульованої гіпотези експерименту;
- потрібне обґрунтоване виділення незалежної та залежної змінних;
- потрібний обов'язковий опис специфічних умов діяльності об'єкта дослідження (місце, час, соціально-економічна ситуація тощо).

Типові помилки в проведенні експерименту

- 1 Сформульовані гіпотези не відбивають проблемну ситуацію, суттєві залежності у даного об'єкта.
- 2 Як незалежну змінну виділено фактор, який не може бути причиною, сталою детермінантою процесів, що відбуваються у даному об'єкті.
- 3 Допущено помилки в попередньому описі об'єкта, що призвело до неправильної емпіричної інтерпретації змінних і вибору неадекватних показників.
- 4 Допущено помилки при формулюванні дослідних і контрольних вихідних результатів експерименту, виявляється значна їх різниця, що викликає сумніви в можливості порівняти ці групи за складом змінних.
- 5 Важко підібрати контрольний об'єкт за однорідними або схожими з експериментальними параметрами.

6 Серед варіативних факторів на вході об'єкта є взаємозалежні.

Робоче місце експериментатора та організація експерименту

Робочим місцем експериментатора називається частина робочого простору, на яке поширюється безпосередній вплив експериментатора в процесі дослідження.

Робочий простір – це частина лабораторного або виробничого приміщення, оснащена необхідними експериментальними засобами, що обслуговується одним або групою дослідників. Робочий простір може бути стаціонарним (в лабораторіях, науково-дослідних закладах, полігонах тощо); умовно-стаціонарним (у пересувних лабораторіях, на тимчасових полігонах); мобільним (у похідних, пересувних лабораторіях).

Лабораторія являє собою спеціально обладнане приміщення, в якому проводяться експериментальні дослідження.

Дослідник (експериментатор) в лабораторії виконує відповідальну роботу, від якої залежить правильність вирішення теоретичної або практичної задачі в цілому. Точність при виконанні методики дослідження, акуратність, старанність при плануванні і підготовці експерименту, уважність при його проведенні – основні умови ефективності експериментальної роботи.

Особливе місце серед причин невдач експериментальних досліджень займають суб'єктивні, джерелами яких є психологічні або психофізіологічні причини. Наприклад, психологічними причинами похибок можуть бути психологічні бар'єри та інерційність мислення. Часто нові неочікувані результати експерименту дослідник намагається пояснити з позицій старих уявлень, і якщо вони не вкладаються в старі уявлення, то розглядаються ним як помилки та відкидаються. Тут має місце

інерційність мислення, віра в досконалість та універсальність старих уявлень, іноді страх перед новим. Іноді дослідник у процесі аналізу результатів експерименту позасвідомо підганяє експериментальні дані, щоб підтвердити раніше висунуту гіпотезу. Іноді помилки в експерименті пов'язані з тим, що дослідник не уявляє чітко, що він має одержати у результаті експерименту.

Все це свідчить про необхідність ретельної підготовки експерименту та багаторазової перевірки його результатів. Розпочинаючи експеримент, дослідник повинен ще раз обдумати та уточнити методику, підготувати всю необхідну документацію (акти, лабораторні зошити, журнали), яка призначена для реєстрації ходу та результатів експерименту.

Обов'язковою вимогою до проведення експерименту є ведення журналу. Форма журналу може бути довільною, але найкраще відповідати процесу, що досліджується для максимальної фіксації всіх факторів.

У процесі експериментальних робіт необхідно строго дотримуватися вимог промислової санітарії, техніки безпеки, пожежної безпеки. Особливо ретельно потрібно виконувати ці вимоги при проведенні виробничих експериментів. Результати деяких лабораторних та більшої частини виробничих експериментів оформлюються протоколом, який підписується керівником виробництва та експериментатором. Якщо досліджуються люди, то протокол підписують і піддослідні.

ЛЕКЦІЯ 16. ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Основи теорії випадкових помилок та методів оцінки випадкових похибок у вимірюваннях

Аналіз випадкових похибок базується на теорії випадкових помилок, яка дає можливість з визначеною гарантією обчислити дійсне значення вимірюваної величини та оцінити можливі помилки.

Основу теорії випадкових помилок складають такі *припущення*:

- при великій кількості вимірів випадкові похибки однакової величини, але різного знаку зустрічаються однаково часто;
- більші похибки зустрічаються рідше, ніж малі (випадковість появи похибки зменшується зі зростанням її величини);
- при нескінченно великому числі вимірів істинне значення вимірюваної величини дорівнює середньоарифметичному значенню всіх результатів вимірів, а поява того чи іншого результату вимірів як випадкової події описується нормальним законом розподілу.

Вирізняють *генеральну та вибірккову сукупність вимірів*.

Під *генеральною сукупністю* розуміють всю множину можливих значень вимірів x_i або можливих значень похибок Δx_i .

Для *вибіркової сукупності* число вимірів n обмежене і у кожному конкретному випадку строго визначається.

Як правило, вважають, що якщо $n > 30$, то середнє значення даної сукупності вимірів $\bar{x}$ достатньо наближається до його дійсного значення.

Теорія випадкових похибок дозволяє оцінити точність та надійність вимірів при даній кількості вимірів або визначити мінімальну кількість вимірів, що гарантує задану точність та надійність вимірів. Разом з цим

виникає необхідність виключити грубі похибки ряду, визначити достовірність одержаних даних тощо.

Для великої вибірки та нормального закону розподілу загальною оціночною характеристикою вимірів є дисперсія ***D*** та коефіцієнт варіації ***K_в***:

$$D = \sigma^2 = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] / n; \quad K_v = \sigma / \bar{x}.$$

Дисперсія характеризує однорідність вимірів. Чим вище *D*, тим більше розкид вимірів. Чим вище *K_в*, тим більше мінливість значень вимірів відносно середніх значень, *K_в* оцінює також розкид при оцінці кількох вибірок.

Довірчим інтервалом значень *x_i* є такий інтервал, в який потрапляє дійсне значення *x_д* вимірюваної величини із заданою імовірністю.

Довірчою імовірністю (вірогідністю) (P_д) вимірів називається імовірність того, що істинне значення вимірюваної величини потрапить до даного довірчого інтервалу, тобто в зону $a < x_d < b$. Ця величина визначається у частках одиниці або у відсотках.

Довірчий інтервал характеризує точність вимірів даної вибірки, а довірча імовірність – достовірність виміру.

Довірча імовірність визначається за допомогою інтегральної функції Лапласа, а довірчий інтервал визначається при ***n > 30*** за допомогою аргументу функції Лапласа, а при ***n < 30*** – за допомогою аргументу функції Стюдента.

Для проведення дослідів із заданою точністю та достовірністю необхідно знати ту кількість вимірів, при якій експериментатор буде

впевнений у позитивному результаті. У зв'язку з цим одним із найперших завдань при статистичних методах оцінки є встановлення мінімального, але достатнього числа вимірів для даних умов. Завдання зводиться до встановлення мінімального обсягу вибірки (числа вимірів або спостережень) N_{min} при заданих значеннях довірчого інтервалу та довірчій імовірності.

Для визначення N_{min} може бути використана така послідовність розрахунків:

- 1) проводиться попередній експеримент з кількістю вимірів n , які становлять залежності від трудомісткості дослідів від 20 до 50;
- 2) розраховується середньоквадратичне відхилення σ за формулою (3.1);
- 3) відповідно до поставлених завдань експерименту визначається потрібна точність вимірів Δ за формулою:

$$\Delta = \sigma_0 / \bar{x}, \quad (3.2)$$

де σ_0 - середньоарифметичне значення середньоквадратичного відхилення σ , яке дорівнює $\sigma_0 = \sigma / \sqrt{n}$.

- 4) встановлюється нормоване відхилення t , значення якого звичайно задається (залежить також від точності методу);
- 5) визначають N_{min} за такою формулою:

$$N_{min} = \sigma^2 t^2 / \sigma_0^2 = k_g^2 t^2 / \Delta^2, \quad (3.3)$$

де k_g – коефіцієнт варіації (мінливості), %;

Δ – точність вимірів, %.

При подальшому проведенні експерименту число вимірів не повинне бути меншим за N_{min} .

У процесі обробки експериментальних даних слід виключати грубі помилки ряду. Однак перш ніж виключити той чи інший вимір, необхідно упевнитись, що це дійсно помилка, а не відхилення внаслідок статистичного розкиду. Найпростішим способом виключення із ряду виміру, що різко відрізняється від інших, є **правило трьох сигм**: розкид випадкових величин від середнього значення не повинен перевищувати

$$x_{max,min} = \bar{x} \pm 3\sigma. \quad (3.4)$$

Методи графічної обробки результатів експерименту

При обробці результатів вимірів та спостережень широко використовують методи графічного зображення. Графічне зображення надає найбільш наочне уявлення про результати експерименту, дозволяє краще пізнати фізичну сутність досліджуваного процесу, виявити загальний характер функціональної залежності змінних величин, що вивчаються, встановити наявність максимуму або мінімуму функції.

Для графічного зображення результатів досліджень, як правило, використовують систему прямокутних координат. Якщо аналізується графічним методом функція $y=f(x)$, то наносять в системі прямокутних координат значення $x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n$. Перш ніж будувати графік, необхідно знати хід (перебіг) досліджуваного явища. Як правило, експериментатор має орієнтовне уявлення про якісні закономірності та форму графіка з теоретичних досліджень.

Точки на графіку необхідно з'єднувати плавною лінією таким чином, щоб вона проходила найближче до всіх експериментальних точок. Якщо з'єднати точки прямими відрізками, то одержимо ламану криву. Вона характеризує зміну функції за даними експерименту. Звичайно функції мають плавний характер. Тому при графічному зображенні результатів дослідження слід проводити між точками плавні криві. Різке викривлення графіка пояснюється похибками вимірів. Якби експеримент повторили з використанням засобів вимірювання більш високої точності, то одержали б менші похибки, а ламана крива більше відповідала б плавній кривій.

Однак можуть бути і винятки, тому що іноді досліджуються явища, для яких у визначених інтервалах спостерігається швидка стрибкоподібна зміна однієї з координат. У таких випадках необхідно

особливо ретельно з'єднувати точки кривої.

Інколи при побудові графіка спостерігається різке віддалення однієї або двох точок від кривої. У цьому випадку спочатку потрібно проаналізувати фізичну сутність явища, і якщо немає підстав до стрибку функції, то таке різке відхилення можна пояснити грубою похибкою.

Часто при графічному зображенні результатів експерименту доводиться мати справу з трьома змінними $b=f(x, y, z)$. У цьому випадку використовують метод поділу змінних. Одній з величин z у межах інтервалу вимірів (z_1 - z_n) надають кілька послідовних значень. Для двох інших змінних x та y будують графіки функцій $y=f_i(x)$ при $z_i = const$. У результаті на одному й тому самому графіку одержують сімейство кривих $y=f_i(x)$ для різних значень z .

При графічному зображенні результатів експерименту великого значення набуває вибір масштабів та координатної сітки.

Координатні сітки бувають рівномірні та нерівномірні. У рівномірних координатних сіток ординати та абсциси мають рівномірну шкалу.

Нерівномірна координатна сітка використовується для більшої наочності у випадках, коли функція має різко змінюваний характер. З нерівномірних координатних сіток найбільшого поширення набули **напівлогарифмічні, логарифмічні та імовірнісні**.

Напівлогарифмічна сітка має рівномірну шкалу на ординаті та логарифмічну шкалу на абсцисі.

Логарифмічна координатна сітка має на двох осях логарифмічні шкали.

Імовірнісні координатні сітки мають на ординаті, як правило, рівномірну шкалу, а на осі абсцис – імовірнісну шкалу.

Доцільність використання нерівномірної функціональної сітки

пояснюється, крім вищезазначеного, бажанням представити функцію, що досліджується, у вигляді прямої, що підвищує точність побудови. При цьому здійснюється так зване вирівнювання, тобто криву, що побудована за дослідними даними, представляють лінійною функцією.

Масштаб за координатними осями, як правило, використовують різний. Від його вибору залежить форма графіка – він може бути пласким (вузьким) або витягнутим (широким) вдовж осі. Вузькі графіки дають більшу похибку на осі ординат, широкі на осі абсцис. Правильно підібраний масштаб дозволяє підвищити точність відрахування. Розрахункові графіки, що мають екстремум функції або який-небудь складний вигляд, особливо ретельно потрібно креслити у зонах вигину. На таких ділянках кількість точок для накреслення графіка повинно бути істотно більшою, ніж на плавних ділянках.

У деяких випадках будують **номограми**, які істотно полегшують використання для систематичних розрахунків складних теоретичних та емпіричних формул у відповідних межах зміни величин.

Номограма (від грец. *nomos* – закон та *gramma* – риска, буква, писемний знак, зображення) – креслення, яке є зображенням функціональних залежностей, які використовуються для одержання (без розрахунків) приблизних розв'язань рівнянь.

Аналітична обробка результатів експерименту

У процесі експериментальних вимірів звичайно одержують статистичний ряд вимірів двох величин, які об'єднуються функцією $y=f(x)$. Кожному значенню функції $y_1, \dots, y_n$ відповідає відповідне значення аргументу $x_1, x_2, \dots, x_n$.

На основі експериментальних даних можна підібрати алгебраїчні вирази, які називають емпіричними формулами. Такі формули підбирають лише у межах виміряних значень аргументу $x_1 - x_n$. Емпіричні

формули мають тим більшу цінність, чим більше вони відповідають результатам експерименту. Досвід показує, що емпіричні формули є незамінними для аналізу вимірних величин. До емпіричних формул висувають дві основні вимоги – по можливості вони повинні бути найбільш простими та точно відповідати експериментальним даним у межах зміни аргументу. Таким чином емпіричні формули є приблизним виразом аналітичних. Заміну точних аналітичних виразів приблизними, більш простими називають апроксимацією, а функції апроксимуючими.

Процес підбору емпіричних формул складається з двох етапів. На першому етапі дані вимірів наносять на сітку прямокутних координат, поєднують експериментальні точки плавною кривою і вибирають орієнтовно вид формули. На другому етапі обчислюють параметри формул, які найкраще відповідали б прийнятій формулі. Підбір емпіричних формул необхідно починати з найбільш простих виразів.

Криві, що побудовані за експериментальними точками, вирівнюють за допомогою статистичних методів. Наприклад, методом вирівнювання, який полягає в тому, що криву, яку побудовано за експериментальними точками, представляють лінійною функцією. Для знаходження параметрів заданих рівнянь часто використовують метод середніх та найменших квадратів.

Для дослідження закономірностей між явищами (процесами), які залежать від багатьох факторів, використовують кореляційний аналіз.

У процесі проведення експерименту виникає потреба перевірити відповідність експериментальних даних теоретичним передумовам, тобто перевірити гіпотезу дослідження. Перевірка експериментальних даних на адекватність необхідна також у всіх випадках на стадії аналізу теоретико-експериментальних досліджень. У практиці адекватності використовують різні критерії: Фішера, Пірсона, Романовського.

Елементи теорії планування експерименту

Теорія математичного експерименту включає ряд концепцій, які забезпечують успішну реалізацію завдань дослідження. До них відносять *концепції рандомізації, послідовного експерименту, математичного моделювання, оптимального використання факторного простору* і деякі інші.

Принцип рандомізації полягає в тому, що до плану експерименту вводять елемент імовірності. Для цього план експерименту складають так, щоб ті систематичні фактори, які складно піддаються контролю, враховувалися статистично і потім виключалися в дослідженнях як систематичні похибки.

При *послідовному проведенні експерименту* виконується не одночасно, а поетапно, для того щоб результати кожного етапу аналізувати та приймати рішення про доцільність проведення подальших досліджень.

У результаті експерименту одержують рівняння регресії, яке часто називають *математичною моделлю процесу*. Для конкретних випадків математична модель створюється на основі цільової направленості процесу та завдань дослідження з урахуванням визначеної точності рішення та достовірності вихідних даних, яка звичайно проводиться за критерієм Фішера. В зв'язку з тим, що ступінь полінома, який адекватно описує процес, передбачити неможливо, спочатку намагаються описати явище лінійною моделлю, а потім, якщо вона неадекватна, підвищують ступінь полінома тобто проводять експеримент поетапно.

Важливе місце в теорії планування експерименту займають питання *оптимізації* процесів, що досліджуються якостей багатокомпонентних систем або інших об'єктів. Як правило, не можна знайти таке поєднання

значень факторів впливу, при якому одночасно досягається екстремум всіх функцій відгуку. Тому в більшості випадків за критерій оптимальності вибирають лише одну зі змінних стану – функцію відгуку, що характеризує процес, а інші беруть прийнятними для даного випадку.

Прийоми викладення матеріалів наукового дослідження

Автор наукової праці може застосовувати декілька *методичних прийомів* викладення наукових матеріалів: ***суворо послідовний; цілісний; вибіркове викладення.***

Суворо послідовне викладення матеріалу наукової праці вимагає від автора послідовного викладення матеріалів – поки автор не закінчить повністю розділ, він не може переходити до наступного. Цей прийом потребує порівняно багато часу.

Цілісний прийом потребує значно меншого часу на підготовку чистового (кінцевого) варіанта рукопису і пов'язаний з розробленням спочатку попереднього варіанта всього рукопису, а потім його обробкою шляхом внесення доповнень та виправлень.

Вибіркове викладення матеріалів в основному застосовується дослідниками-експериментаторами. Як тільки зібрані фактичні дані, автор починає обробку матеріалів у будь-якому зручному для нього порядку.

У науковій практиці найбільшого поширення набув цілісний прийом викладення наукових матеріалів.

На етапі роботи над рукописом вже з самого початку бажано виділяти *основні композиційні елементи*: вступ, основну частину, висновки та пропозиції; бібліографічний список використаних джерел; додатки.

Існують такі рекомендації щодо *підготовки наукової праці*:

- продумати основні питання, які потрібно викласти (у будь-якому порядку), записуючись думки;
- звести інформацію до однієї прийнятної системи і тільки після цього намагатися створювати добре побудовані речення з організацією їх у граматично оформлені абзаци;
- щоб підійти до роботи по-новому, доцільно відкласти роботу на декілька днів, а потім повернутися до неї знову;
- прочитати вголос те, що написано, оскільки сприйняття на слух часто дає можливість відчувати різницю між тим, що хотілося б сказати, і тим, що дійсно сказано.

Починати роботу над остаточним варіантом рукопису необхідно тоді, коли попередній варіант повністю готовий. На цьому етапі всі необхідні матеріали повинні бути зібрані та оброблені, висновки узагальнені та сформульовані. З цього моменту починається детальне «шліфування» тексту рукопису. Перевіряються і критично оцінюються висновки, формули, таблиці, речення, окремі слова. Автор перевіряє, наскільки заголовки його роботи та назви розділів і параграфів відповідають їх змісту, уточнює композицію наукового твору, розміщення матеріалів і їх рубрики. Бажано ще раз перевірити переконливість аргументів, захист наукових положень, тверджень.

Мова та стиль наукової роботи

Мова – це будь-яка знакова система, що виконує пізнавальну та комунікативну функції у процесі людської діяльності.

Не викликає сумнівів необхідність використання мови на теоретичному рівні наукових досліджень для формулювання гіпотез,

законів, теоретичних тверджень дослідження і логічних висновків. Наукове спостереження, постановка та проведення експериментів також неможливі без мови, тому що з її допомогою фіксуються та описуються отримані результати.

Методологія науки розглядає мову як засіб вираження, фіксації, переробки, передачі та зберігання наукових знань, наукової інформації.

Стилістичні вимоги, що висуваються до наукової роботи, складаються з двох компонентів – вимог сучасної української літературної мови та вимог так званого академічного етикету.

Академічний етикет щодо тексту наукової роботи – це визначені принципи письмового спілкування членів наукового співавторства між собою.

Сукупність засобів, вибір яких зумовлюється змістом, метою та характером висловлювання утворює ***мовний стиль***. Існують такі стилі мови: розмовний, художній, діловий, публіцистичний, науковий.

Розглянемо докладніше особливості ***наукового стилю***.

Сфера застосування наукового стилю – наукова діяльність, освіта.

Основне призначення – повідомлення про результати досліджень, доведення теорій, обґрунтування гіпотез, класифікацій, роз’яснення сутності явищ, систематизація знань тощо.

Функціями наукового стилю є обслуговування потреб науки, навчання й освіти; пізнавально-інформативна та функція доказовості.

Науковий стиль відрізняється використанням спеціальних термінів, суворістю та діловитістю викладення.

Основною стильовою ознакою наукової мови є об’єктивність викладення, яка впливає зі специфіки наукового пізнання. Звідси й наявність у тексті наукових робіт вступних слів і словосполучень, які

вказують на ступінь достовірності повідомлення. Завдяки таким словам той чи інший факт можна представити як достовірний (*«розуміється»*, *«справді»*), як передбачений (*«потрібно передбачити»*), як можливий (*«можливо»*, *«ймовірно»*).

Текст поділяється послідовно на розділи, параграфи, пункти, підпункти. Переважають речення складної, але «правильної» побудови, часто ускладнені зворотами.

Стиль наукової роботи – це стиль безособового монологу, позбавленого емоційного та суб'єктивного забарвлення. Автор у роботі не повинен давати оцінку власним досягненням. Норми наукової комунікації суворо регламентують характер викладення наукової інформації. У зв'язку з цим автору наукової роботи слід намагатися застосовувати мовні конструкції, що виключають вживання особового займенника першої особи однини «я». На сьогодні стало неписаним правилом, коли автор роботи виступає в множині та замість «я» вживає займенник «ми», що дозволяє висловити свою думку як думку певної групи людей, наукової школи або наукового напрямку. І це цілком виправдано, оскільки сучасну науку характеризують такі тенденції, як інтеграція, колективна творчість, комплексний підхід до вирішення проблем.

Для того щоб урізноманітнити текст, конструкції із займенником «ми» можуть замінюватися невизначено-особовими реченнями, напр., *«щодо питання визначення економічного потенціалу підприємства існують різні точки зору»*. Вживається також форма викладення від третьої особи (наприклад, *«на думку автора...»*). Аналогічні функції виконують речення пасивного стану (напр., *«розроблено комплексний підхід...»*).

Отже, у науковому тексті вся увага зосереджується на змісті та

логічній послідовності повідомлення, а не на суб'єкті.

Найбільш характерною особливістю письмової наукової мови є побудова викладення у формі міркувань і доказів. Принципову роль у тексті відіграють наукові терміни, які потрібно вживати в їх точному значенні, вміло і доречно. Не можна довільно поєднувати в одному тексті різну термінологію.

Зважаючи на сувору послідовність наукової мови, необхідно відзначити, що логічна цілісність і взаємозв'язаність його частин вимагає широкого використання складних речень. Переважають складнопідрядні речення, оскільки вони більш гнучко відбивають логічні зв'язки всередині тексту. Окремі речення і частини складного синтаксичного цілого, як правило, дуже тісно пов'язані один з одним, кожен наступний базується на попередньому або є наступною ланкою у роздумах.

Обов'язковою умовою об'єктивності викладення матеріалу є необхідність посилання на джерело повідомлення, на того, ким повідомлена та чи інша думка, кому конкретно належить той чи інший вислів. У тексті цього можна досягти, використовуючи спеціальні вступні слова та словосполучення («на думку...», «за даними...», «на наш погляд...» тощо).

До якісних характеристик, які визначають культуру наукової мови, належать **чіткість, зрозумілість і стислість**.

Чіткість наукової мови зумовлюється не тільки цілеспрямованим вибором слів і висловів, але й вибором граматичних конструкцій, які передбачають чітке дотримання норм зв'язку слів у словосполученні.

Зрозумілість, тобто вміння писати доступно, є також необхідною якісною характеристикою наукової мови.

Стислість є обов'язковою якісною характеристикою наукової мови, яка визначає її культуру. Реалізація цієї якості означає вміння

уникати повторів, надлишкової деталізації. Слова та словосполучення, які не несуть будь-якого змістовного навантаження, повинні бути виключені з тексту роботи.

Складання та оформлення звітів з НДР

Складання та оформлення звітів з науково-дослідної роботи проводиться у відповідності до вимог ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення». Цей стандарт поширюється на звіти про роботи (дослідження, розроблення) або окремі етапи робіт, що виконуються у сфері науки і техніки.

Стандарт установлює загальні вимоги до побудови, викладення та оформлення звітів про будь-які науково-дослідні, дослідно-конструкторські і дослідно-технологічні роботи. Стандарт може бути застосований також до таких документів, як дисертації, річні звіти, посібники тощо.

Згідно зі стандартом звіт з НДР умовно поділяється на такі структурні одиниці: ***вступну частину; основну частину; додатки.***

Вступна частина містить такі структурні елементи: *титульний аркуш; список авторів; реферат; зміст; перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів; передмову.*

Основна частина містить такі структурні елементи: *вступ; суть звіту; висновки; рекомендації; перелік посилань.*

Додатки розміщують після основної частини звіту.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Балтовський О.О., Форос Г.В., Сіфоров О.І. Основи математичного моделювання/ За заг. ред. д.т.н., доц. О.А. Балтовського. — О.: ОДУВС, 2023.— 156 с.
2. Чуйко Г. П. Математичне моделювання систем і процесів : [навчальний посібник] / Г. П. Чуйко, О. В. Дворник, О. М. Яремчук. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ імені Петра Могили, 2015. – 244 с.
3. Сидорика Ігор Методичні рекомендації для підготовки з лекційних занять для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної форми навчання ОПП "Агроінженерія", спеціальності 208 «Агроінженерія» денної форми здобуття вищої освіти. Миколаїв 2024
4. Кацадзе Т. Л. Електричні системи та мережі. Частина 2 Розрахунок та аналіз усталених режимів електроенергетичних систем. Матеріали лекцій 2016
5. Кутовська О. В. Методологія системного підходу та наукових досліджень: Курс лекцій. – Тернопіль: Економічна думка, 2005. – 124 с.
6. Поворознюк А. І., Поворознюк О. А. Методи та засоби моделювання складних динамічних об'єктів: Лабораторний практикум. Для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» – Харків: НТУ «ХПІ», 2024 – 85 с.
7. Ягуп В. Г. Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання : навч. посібник / В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 183 с.
8. Моделювання та оптимізація електроенергетичних та електромеханічних систем: Навчальний посібник. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійної та освітньо-наукової програм магістерської, освітньо-наукової програми магістерської підготовки

«Електроенергетика та електромеханіка» / В. А. Баженов; КПІ ім. Ігоря Сікорського.– Електронні текстові дані (1 файл: 4,32 Мбайт).– Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 78 с.

9. Бурбело, М. Й. Математичні задачі електроенергетики. Математичне моделювання електропостачальних систем : навчальний посібник / М. Й. Бурбело – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 185 с.

10. Верлань А. А., Федорчук В. А. Моделювання комп'ютерно-інтегрованих силових енергетичних установок: монографія. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2023. 296 с.

11. Конспект лекцій по курсу «Моделювання та дослідження електротехнічних комплексів» (Для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Проф. В.С. Білецький – Запоріжжя, 2024. 240 с.

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

13. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В.– Кременчук, 2001. – 410 с.

14. Математичне моделювання об'єктів електроенергетики: розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; укл. Гаєвська Г.М. Електронні текстові дані (1 файл: 1,34 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.- 28 с.

15. Математичні моделі електричних систем : Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електричні системи і мережі» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. Л. Кацадзе, О. М. Паненко. —

Електронні текстові дані (1 файл: 951 кБ). — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 63 с.

16. Системний аналіз: методичні вказівки до практичних занять [для здобувачів першого (бакалаврський) рівня вищої освіти галузі знань 7 «Інформаційні технології»]. / Уклад.: Л.А. Нікітюк, Р.Ю. Царьов. Одеса: ДУІТЗ (Електр. вид. <https://metod.suitt.edu.ua>), 2024. 54 с.

Навчальне видання

Чернюк Артем Михайлович

Войтенко Сергій Миколайович

**АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ ТА
ОБ'ЄКТАХ**

Конспект лекцій